

Análisis económico del autoconsumo fotovoltaico residencial colectivo



Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Pablo De la Portilla Planillo

Julio María Pascual Miqueleiz

Pamplona, 18/10/2020

Resumen

El incremento de la preocupación por el cambio climático y el abaratamiento de la tecnología fotovoltaica ha provocado que cada vez más personas opten por el autoconsumo eléctrico. No obstante, el periodo de retorno de estas inversiones sigue sin atraer a la mayoría de la población y un aumento de la rentabilidad podría acelerar esta transición energética. Mediante el análisis del impacto de las distintas tarifas eléctricas en el coste de las facturas en combinación con el autoconsumo fotovoltaico, se tratará de encontrar las opciones más rentables. Así mismo, se expone la posibilidad de ahorro que ofrece agrupar varias viviendas en una sola entidad de consumo energético, lo que permite acogerse a tarifas más económicas, reducir la potencia contratada y realizar intercambios de excedentes a precios más convenientes para los implicados. En definitiva, conseguir una mayor rentabilidad de la inversión en los generadores fotovoltaicos y aumentar el ahorro en la factura eléctrica.

Palabras clave: Autoconsumo fotovoltaico, autoconsumo colectivo, tarifas eléctricas, estudio energético, compensación simplificada.

Abstract

The increasing concern about climate change and the decrement on prices of photovoltaic technology has caused that a growing number of people to opt for electricity self-consumption. However, the payback period for these investments is still not attracting most of the population and an increased profitability could accelerate this energetical transition. By analyzing the impact of the different electricity tariffs on the cost of the bills in combination with the photovoltaic self-consumption, we will try to find the most profitable options. Likewise, the possibility of savings offered by grouping several homes in a single energy consumption entity is exposed, which allows to benefit from cheaper tariffs, reduce the contracted power and carry out surplus exchanges at more convenient prices for those involved. In short, to achieve a higher return on investment in photovoltaic generators and increase savings on electricity bills.

Keywords: Photovoltaic self-consumption, collective self-consumption, electricity tariffs, energy study, simplified compensation.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objeto del proyecto	1
1.2.	Justificación	1
1.3.	Antecedentes	2
1.4.	Legislación	4
1.4.1.	Autoconsumo sin excedentes	4
1.4.2.	Autoconsumo con excedentes	4
1.5.	Software de cálculo	6
2.	CASOS DE ESTUDIO: PERFILES DE CONSUMO Y GENERACIÓN	7
2.1.	Perfiles de consumo	7
2.1.1.	Consumo total del conjunto de viviendas.....	22
2.2.	Influencia de las tarifas en la factura	24
2.3.	Recurso solar	33
2.3.1.	Localización y climatología	33
2.3.2.	Generación fotovoltaica.....	36
2.4.	Costes de la instalación	43
2.4.1.	Precio del inversor.....	43
2.4.2.	Precio de los paneles.....	47
2.4.3.	Mano de obra.....	47
3.	ESCENARIOS DE AUTOCONSUMO	49
3.1.	Autoconsumo individual	49
3.2.	Autoconsumo colectivo.....	49
3.3.	Autoconsumo agrupado con óptimo colectivo	50
3.4.	Autoconsumo agrupado con óptimo individual.....	52
4.	RESULTADOS	53
4.1.	Autoconsumo individual	53
4.2.	Autoconsumo colectivo.....	55
4.3.	Autoconsumo agrupado con óptimo colectivo	58
4.4.	Autoconsumo agrupado con óptimo individual.....	59
5.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	62
6.	REFERENCIAS	66

Después de muchos meses de trabajo y con el aprobado de la última asignatura del grado ya como un recuerdo lejano, escribo este apartado de agradecimientos con el fin de reconocer a las personas que me han acompañado en el camino. El desarrollo de este trabajo ha sido intermitente y prolongado, pero ya llega su fin.

En primer lugar, querría agradecer la colaboración de mi tutor por su constante apoyo y su infinita paciencia, dado que, si algo ha hecho falta en el seguimiento de este trabajo, ha sido eso, paciencia.

También quiero agradecer a todas las personas que quisieron colaborar y me facilitaron datos importantes para el desarrollo de las simulaciones de este trabajo y sin los cuales este estudio no hubiese sido posible. De la misma forma, debo agradecer a mi amigo Gorka, quien, en momentos de frustración, me ha apoyado y ayudado con piezas clave del código.

Por último, siempre le agradeceré a mis padres y mi hermana su esmero en mi desarrollo educativo desde que era un niño, y su apoyo tanto durante la realización de este trabajo como durante toda mi vida.

Dedicado a mis padres, por la educación y valores que me han transmitido.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se van a estudiar las ventajas económicas de implantar un sistema de autoconsumo fotovoltaico colectivo en el que los distintos participantes puedan intercambiar sus excedentes de energía de forma interna. Este sistema permite reducir el coste la potencia contratada, la adhesión a tarifas de mercado con precios más reducidos, reducir el consumo de energía de la red y sacar un mayor beneficio de la energía generada en exceso.

Para alcanzar resultados lo más próximos a la realidad posible se ha realizado la simulación del consumo eléctrico de diez viviendas reales y se han estudiado distintos escenarios.

1.1. Objeto del proyecto

El presente proyecto tiene por objeto el estudio de viabilidad de autoconsumo de energía eléctrica mediante el empleo de módulos fotovoltaicos en una comunidad de vecinos.

Más detenidamente, este proyecto pretende:

- Estudiar el recurso solar del emplazamiento.
- Analizar los consumos individuales de cada residente y valorar sus necesidades de autoconsumo.
- Comparar el autoconsumo individual estudiado con un autoconsumo colectivo de todos o parte de los vecinos.
- Ahondar en el nuevo marco regulatorio del autoconsumo y sus posibilidades.

1.2. Justificación

Con la aprobación del Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, se establece un mecanismo simplificado de compensación de la energía producida y excedentaria de los pequeños consumidores [1]. Esto, junto con el constante abaratamiento de la tecnología fotovoltaica, permite que el autoconsumo vuelva a ser económicamente viable.

Por otro lado, y en el caso del autoconsumo colectivo, el Real Decreto también abre la puerta a que un consumidor pueda aprovechar los excedentes de su vecino y coparticipe de autoconsumo.

La implementación de instalaciones de autoconsumo no solo beneficiará a los consumidores, reduciendo significativamente la factura de la luz, también se reducirá las emisiones de gases contaminantes, la huella de carbono de los consumidores y el mercado eléctrico tenderá a ser más limpio, descentralizado y menos dependiente de combustibles fósiles.

1.3. Antecedentes

La creciente concienciación de la sociedad y la independencia energética que otorga la tecnología fotovoltaica ha provocado que los países desarrollados y algunos en vías de desarrollo hayan optado por incorporar la generación fotovoltaica en sus redes eléctricas.

Hasta hace aproximadamente una década la mayoría de la potencia fotovoltaica instalada era generalmente de sistemas aislados. Pero en los últimos años, la instalación concentrada y distribuida, pero conectada a la red, ha nublado la capacidad instalada en sistemas aislados. Desde entonces, la potencia instalada a nivel global ha crecido de forma exponencial.

La ilustración 1 muestra la pobre inversión en fotovoltaica que realizó España en 2016 en comparación con el resto de los países [2]. Este dato resulta paradójico si lo comparamos con los datos detallados a continuación. En la ilustración 2 se muestra la producción de energía eléctrica procedente de la fotovoltaica de diferentes países y en la ilustración 3 se muestra de forma porcentual el factor de capacidad de estos [3]. Entre ellos destaca España, con un FC de 18,9%. Esto se debe al clima de la península ibérica, la mayor cantidad de horas de sol y la disponibilidad de más terrenos útiles. Es por esto, por lo que el hecho de que España tenga menos potencia instalada resulte paradójico.

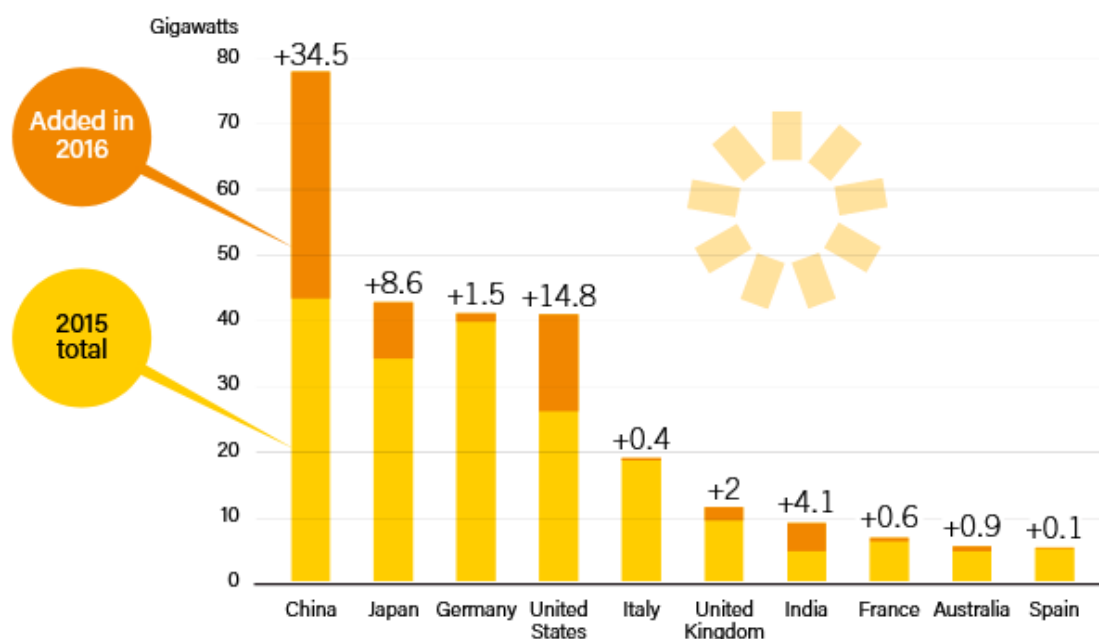


Ilustración 1: Capacidad y adiciones de energía solar FV, diez países líderes, 2016
Renewables 2017 Global Status Report (Ren21, 2017)



Ilustración 2: Capacidad fotovoltaica per cápita (Wp/hab) para cada país perteneciente a la UE en 2016

Photovoltaic Barometer, 2017

	2015	2016	
Germany	38 726	38 272	10,5%
Italy	22 942	22 545	13,4%
United Kingdom	7 561	10 292	10,2%
France	7 748	8 790	14,0%
Spain	8 266	7 948	18,9%
Greece	3 900	3 930	17,2%
Belgium	3 045	2 905	
Czech Republic	2 264	2 128	
Romania	1 982	1 845	
Netherlands	1 122	1 530	
Bulgaria	1 383	1 285	
Austria	937	1 077	
Denmark	604	858	
Portugal	799	816	
Slovakia	506	500	
Slovenia	374	300	
Hungary	123	124	
Poland	57	130	
Sweden	97	135	
Malta	93	103	
Luxembourg	104	98	
Cyprus	126	94	
Lithuania	73	67	
Croatia	57	61	
Finland	9	9	
Ireland	2	4	
Estonia	0	0	
Latvia	0	0	
European Union	102 799	105 324	

Ilustración 3: Producción eléctrica proveniente de instalaciones fotovoltaicas en la UE en 2015
Photovoltaic Barometer, 2017

La ilustración 4 muestra como la tendencia creciente de la potencia instalada en España sufrió un gran parón desde 2012 hasta 2018 [4].

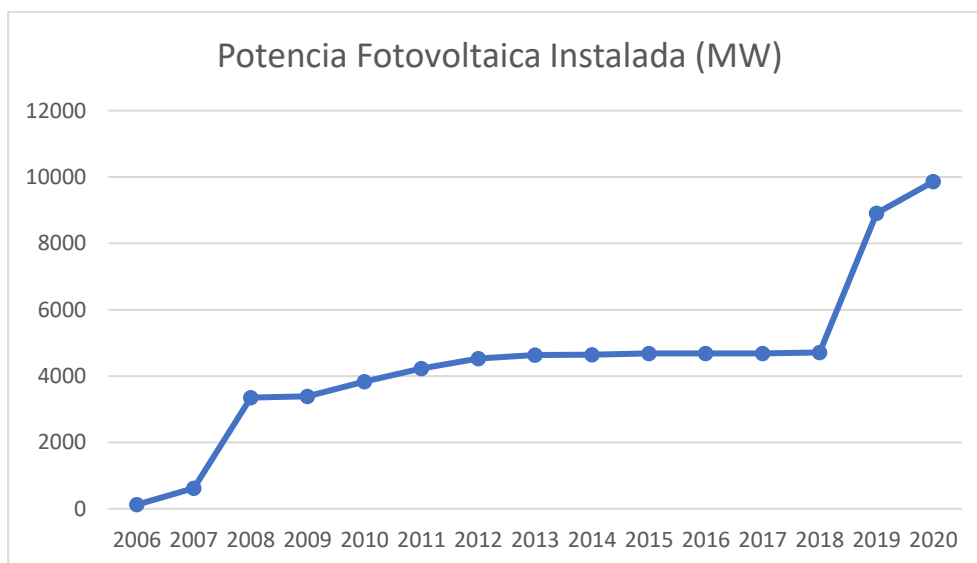


Ilustración 4: Potencia fotovoltaica instalada en España

Fuente: Red eléctrica española

Esto se debe a que el 27 de enero de 2012 se eliminaron las primas a las energías renovables y dejaron de ser una inversión tan viable [5]. En el caso particular de la fotovoltaica distribuida o del autoconsumo, hay que añadir que en octubre de 2015 el gobierno aprobó el famoso impuesto al Sol, el nombre popular que se le dio al peaje de respaldo (o cargos del RD 900/2015, de 9 de octubre) [6] y quedó dictado en el BOE. Consistía en los importes a pagar por seguir conectado a la red eléctrica, aunque no se hiciera uso de ella, y en concepto de costes y

servicios del sistema. La polémica se servía en cuanto aquellas personas que se disponían a legalizar la instalación y debían pagar por servicios que no utilizaban y dejando de ver económicamente viable la solución fotovoltaica.

Sin embargo, en abril de 2019 se derogó ese impuesto con el Decreto-ley 15/2018, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores [7]. Pero no se completa el marco regulatorio hasta que en abril de 2019 el Consejo de Ministros aprueba la propuesta del Ministerio para la Transición Ecológica, el Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica [1].

Entre otras cuestiones, esta norma habilita la figura del autoconsumo colectivo lo que permitirá impulsar esta fórmula en comunidades de vecinos. También se establece un mecanismo simplificado de compensación de la energía producida y no consumida instantáneamente por los pequeños autoconsumidores, lo que la solución fotovoltaica vuelve a ser económicamente viable para el pequeño consumidor. Esto permite posibilidades de implementación que, hasta el momento, no estaban contempladas. Tal y como señala la exposición de motivos del Real Decreto, el impulso del autoconsumo tendrá un “efecto positivo sobre la economía general, sobre el sistema eléctrico y energético y sobre los consumidores

El Real Decreto también reduce los trámites, especialmente en el caso de los pequeños autoconsumidores.

La extensión de esta fórmula fomentará la actividad económica y el empleo local, por su carácter distribuido; favorecerá la electrificación de la economía, permitiendo a España cumplir con sus obligaciones en materia de lucha contra el cambio climático; ofrecerá una alternativa a los ciudadanos, que puede ser más ventajosa económicamente que el consumo de energía tradicional; y permitirá la entrada de nuevos actores, y de la propia ciudadanía, en el sistema eléctrico.

1.4. Legislación

El Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica establece dos modalidades de autoconsumo: Sin excedentes y con excedentes [1].

1.4.1. Autoconsumo sin excedentes

Estas instalaciones necesitarán un equipo anti vertido que garantice que no se vierte nada de energía a la red. Su tramitación administrativa es mínima, pero al no acogerse a ningún tipo de compensación, no resulta una opción tan rentable.

1.4.2. Autoconsumo con excedentes

Son aquellas instalaciones que en ciertos momentos van a verter energía solar en la red eléctrica, por ejemplo, una vivienda o industria sin actividad en horas centrales del día. Dentro de esta modalidad distinguimos dos bloques importantes:

a) Modalidad con excedentes acogidos a compensación

En esta modalidad la comercializadora eléctrica compensa en la factura eléctrica la energía vertida a la red. A esta modalidad, sin duda la más relevante del RD podrán acogerse todas aquellas instalaciones con una potencia no superior a 100 kilovatios (kW), y siempre que

produzcan electricidad a partir de energía de origen renovable. La compensación económica puede llegar hasta el 100% de la energía consumida por el usuario en ese mes.

Para entender este sistema, primero es necesario conocer los distintos conceptos de la factura eléctrica. Como ejemplo se van a mostrar dos facturas ficticias: la representada en la ilustración 5 corresponde a la factura de una vivienda sin fotovoltaica instalada. La ilustración 6, por su parte, muestra el mismo caso si se hubiese instalado fotovoltaica.

La factura se divide en dos costes principales: el término fijo y el término variable.

El primero es una tasa anual, depende de la potencia contratada por el usuario, y se comprende del peaje de acceso a la red y de un margen que cobra la comercializadora.

El término variable, sin embargo, va en función de la energía consumida mensualmente. En función de la tarifa contratada, la comercializadora establece un coste fijo del kWh de energía o un coste distinto dependiendo la franja horaria del día. Al final del mes, el computo de los costes de energía junto con otro peaje de acceso que esta vez va sujeto a la energía consumida, suman el término variable.

A la suma de los dos términos hay que aplicarle el impuesto eléctrico (5,11%), posteriormente el alquiler del contador y finalmente el IVA (21%).

Factura sin instalación FV				
Periodo de factura:		31 días		
Potencia contratada		kW	€/kW/año	
Peaje de acceso		9,9	38,043426	31,99 €
Margen comercialización		9,9	9,6121	8,08 €
TOTAL término fijo				40,07 €
Energía consumida		kWh	€/kWh	
Coste energía (P1)		256	0,088793	22,73 €
Coste energía (P3)		44	0,068174	3,00 €
Peaje de acceso (P1)		256	0,062012	15,88 €
Peaje de acceso (P3)		44	0,002215	0,10 €
TOTAL término variable				41,70 €
Subtotal				81,77 €
Impuesto eléctrico (5,11%)				4,18 €
Alquiler contador		31 días	0,026666	0,83 €
Subtotal				86,78 €
IVA (21%)				18,22 €
TOTAL FACTURA				105,00 €

Ilustración 5: Factura sin instalación fotovoltaica

En el caso de acogerse a la modalidad de autoconsumo con excedentes y compensación simplificada, la energía generada y no consumida por el usuario sería vertida a la red a fin de recibir una compensación. El precio de la energía entregada a la red estará fijado por la

comercializadora. La compensación nunca podrá superar el importe de la energía consumida y peajes de acceso de forma que el término variable nunca sea inferior a cero.

Factura con instalación FV				
Periodo de factura:		31 días		
Potencia contratada		kW	€/kW/año	
Peaje de acceso		9,9	38,043426	31,99 €
Margen comercialización		9,9	9,6121	8,08 €
TOTAL término fijo				40,07 €
Energía consumida		kWh	€/kWh	
Coste energía (P1)		70	0,088793	6,22 €
Coste energía (P3)		44	0,068174	3,00 €
Peaje de acceso (P1)		70	0,062012	4,34 €
Peaje de acceso (P3)		44	0,002215	0,10 €
Excedentes FV		300	-0,04	-12,00 €
TOTAL término variable				1,65 €
Subtotal				41,72 €
Impuesto eléctrico (5,11%)				2,13 €
Alquiler contador		31 días	0,026666	0,83 €
Subtotal				44,68 €
IVA (21%)				9,38 €
TOTAL FACTURA				54,07 €

Ilustración 6: Factura con instalación fotovoltaica

Los datos empleados en estas tablas son estimaciones energéticas. No obstante, en el desarrollo de este proyecto se podrán observar resultados reales fruto de simulaciones con MatLab.

b) Modalidad con excedentes no acogida a compensación simplificada

Estas instalaciones son aquellas, en principio mayores de 100 kW, cuyos excedentes van a ser volcados a la red, pero en régimen de venta, no de compensación. El precio de la energía vertida será el dispuesto por la legislación de instalaciones generadoras de electricidad.

1.5. Software de cálculo

Para el cálculo de los valores de generación fotovoltaica, consumo energético de las viviendas o de intercambio de energía hace falta procesar decenas de miles de datos de irradiancia solar, temperatura, consumo, etc. Por ello, se va a emplear el software de cómputo numérico MATLAB.

MATLAB es un programa que permite la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones y la implementación de algoritmos con relativa facilidad y sin un gran conocimiento de programación. Además, mediante pequeñas modificaciones en el código, se podrán comparar diferentes escenarios y condiciones.

2. CASOS DE ESTUDIO: PERFILES DE CONSUMO Y GENERACIÓN

El primer paso en el desarrollo de este proyecto ha sido la recopilación de datos de consumos, irradiancia y temperatura ambiente. Para ellos se solicitó a diferentes usuarios de la red de distribución de Iberdrola sus credenciales para poder acceder a los datos de consumo de sus viviendas. Todas las viviendas de las que se solicitaron los datos están ubicadas en la cuenca de Pamplona para que las condiciones climatológicas, horas de luz y otros factores sociales fueran homogéneos en los distintos perfiles de consumo.

Los datos de irradiancia y temperatura utilizados para el cálculo de generación fotovoltaica son los registrados por la estación climatológica de la escuela técnica superior de ingenieros agrónomos (ETSIA) de la Universidad pública de Navarra en el año 2018. A estos datos se accede a través de la página web del gobierno de Navarra, y permite calcular el histórico de radiación solar en periodos de diez minutos para una inclinación y orientación concreta.

2.1. Perfiles de consumo

En este proyecto se va a valorar la viabilidad del autoconsumo individual de 10 perfiles de consumo distintos, así como el autoconsumo colectivo de todos ellos.

Estos perfiles no pertenecen directamente a los propietarios reales de las viviendas del emplazamiento, pero todos ellos son vecinos de Pamplona. De esta forma, dejando a un lado los hábitos de consumo individuales de cada uno de los vecinos, todos ellos han experimentado las mismas condiciones climáticas y sociales durante el año 2018.

En este apartado se va a analizar el consumo de los vecinos durante el año 2018 y sin hacer uso de energía fotovoltaica, su estado actual. Para ello, se estudiarán sus conductas de consumo con tres graficas distintas.

Con la primera, se pretende ilustrar el consumo energético mes a mes de cada vivienda para poder identificar los meses de mayor consumo energético.

La segunda gráfica representa el día medio o normal de consumo de los vecinos. Estas curvas se han obtenido realizando la media anual del consumo de potencia a cada hora del día. Esto ayuda a comprender los hábitos de consumo a escala diaria.

La tercera de las gráficas está representada por una función de distribución acumulada de los consumos de potencia. Esta distribución se ha realizado con muestras de potencia de periodos horarios. Esta función permite entender con facilidad la frecuencia con la que se hace consumo a distintos niveles de potencia.

a) Perfil 1

- 4 adultos
- Calefacción de gas
- 2272 kWh/año
- Potencia contratada: 2,83 kW

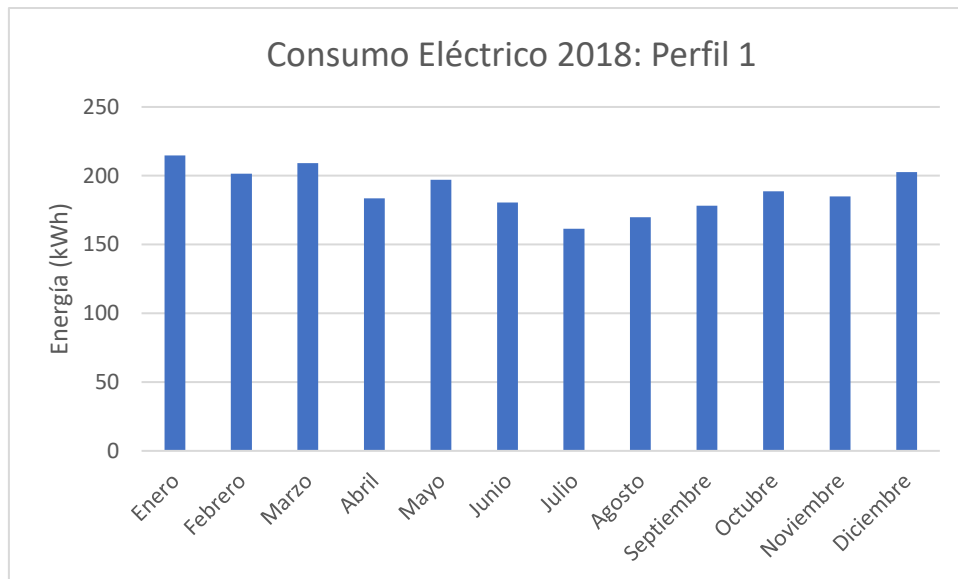


Ilustración 7: Consumo eléctrico 2018: Perfil 1

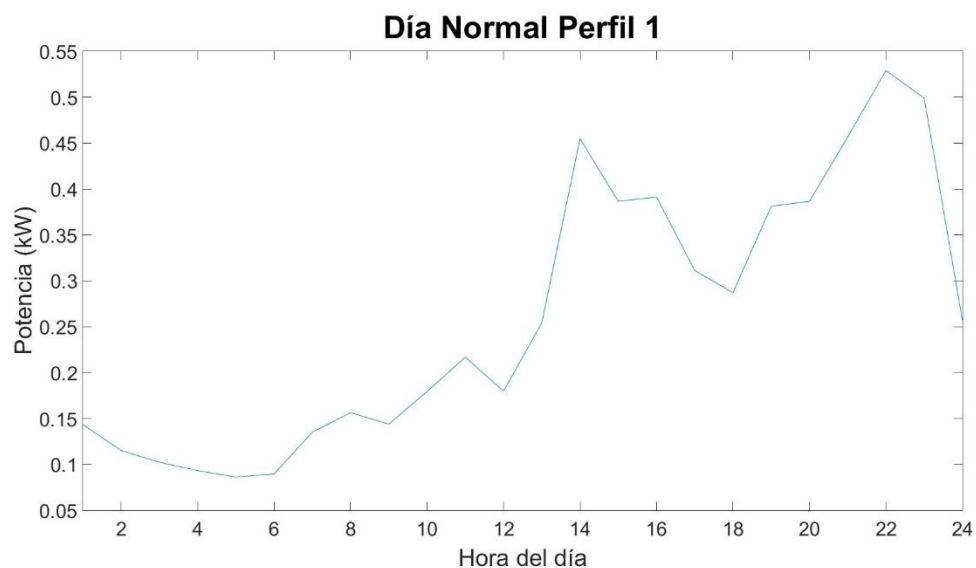


Ilustración 8: Día normal, Perfil 1

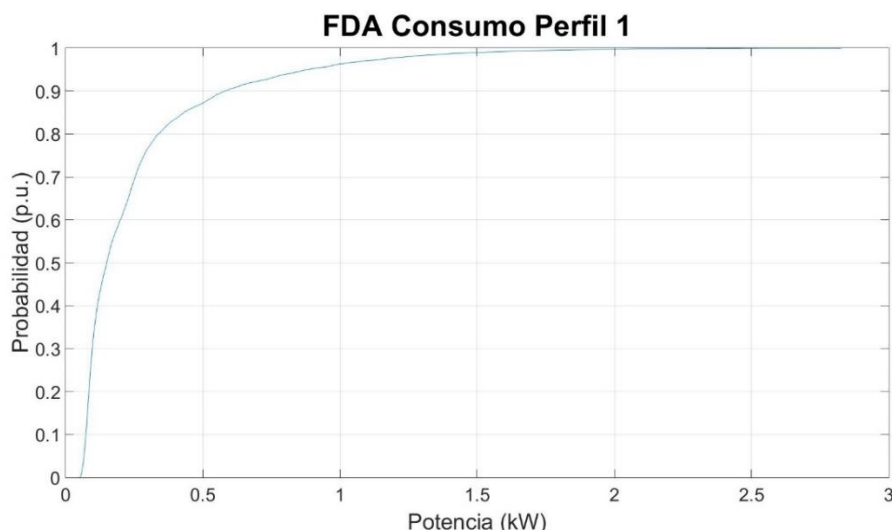


Ilustración 9: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico: Perfil 1

El 80% del tiempo no se superan los 0,35kW.

b) Perfil 2

- 4 adultos
- Calefacción eléctrica
- 12000 kWh/año
- Potencia máxima: 10,7 kW
- Potencia contratada: 9,9 kW

Se trata del perfil más distinto: Al utilizar acumuladores eléctricos y estufas, así como un termo eléctrico calentar el agua, el consumo eléctrico de esta vivienda en los meses de invierno es muy alto. Pese a que la potencia máxima solicitada por esta vivienda en el año 2018 fue de 10,7kW, la potencia contratada en la realidad es de 9,9kW. Es así para poder acogerse a las tarifas 2.0 de energía. Es posible que el interruptor magnetotérmico general de la vivienda abra el circuito en ciertas ocasiones del año, pero superar los 10kW de potencia conlleva un aumento de los términos de la factura.

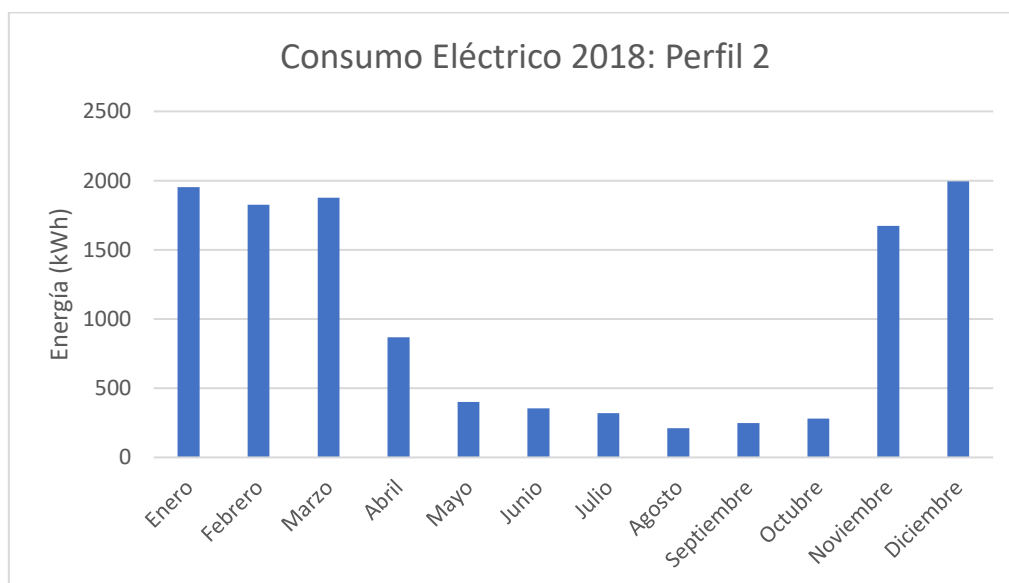


Ilustración 10: Consumo eléctrico 2018, Perfil 2

Como es fácil apreciar, al utilizar calefacción exclusivamente eléctrica, esta vivienda emplea mucha más energía los meses de invierno que los de verano.

El vecino programa el consumo eléctrico de calefacción en horario valle para ahorrar en la factura de la luz. No obstante, esta gráfica es una media de todo el año y, en el caso del pico de potencia causado por la calefacción, este se ve atenuado respecto a su potencia real en los meses de invierno, que puede llegar a alcanzar los 11 kW.

A pesar de ser el perfil de mayor consumo, a lo largo del día este tiene dos periodos muy bien definidos.

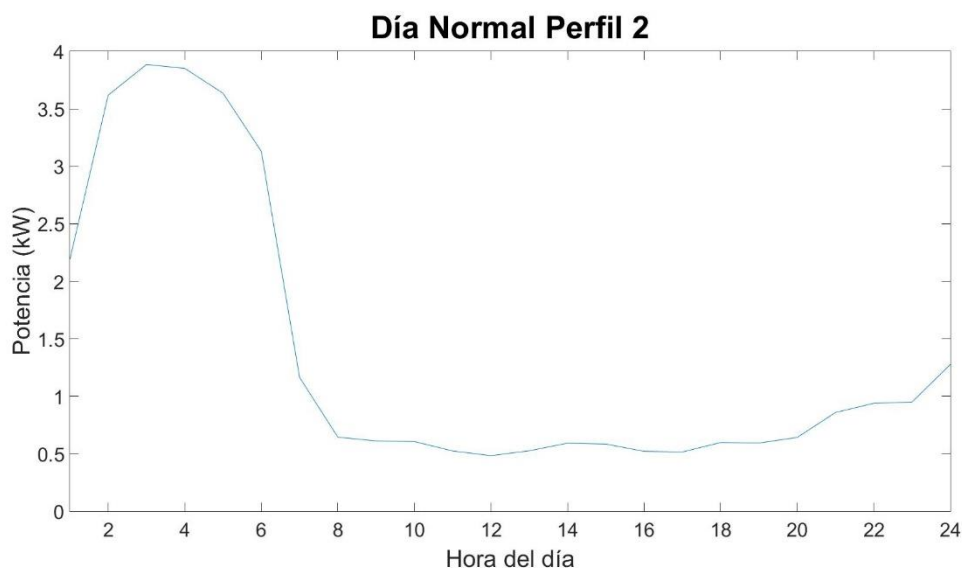


Ilustración 11: Día normal, Perfil 2

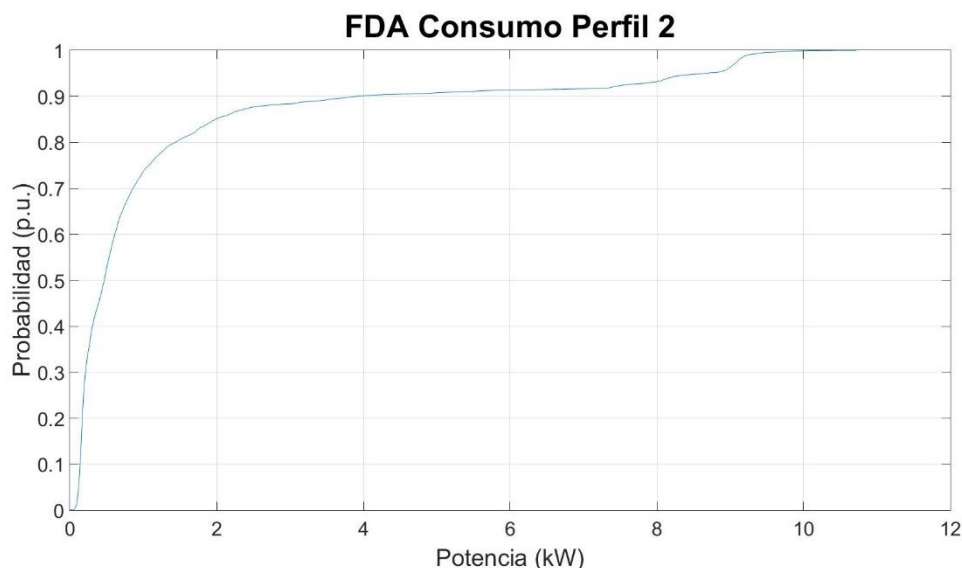


Ilustración 12: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 2

Pese a que esta vivienda hace un gran uso de potencia, el 80% del tiempo no emplea más de 1,5kW.

c) Perfil 3

- 4 adultos
- Calefacción central
- 2480 kWh/año
- Potencia contratada: 2,67 kW

El consumo eléctrico en una vivienda con calefacción no eléctrica y expuesta a un clima con veranos moderados se muestra como un consumo muy uniforme a lo largo del año. Este es el comportamiento normal del resto de las viviendas estudiadas y las variaciones que puedan mostrar unas de otras se deben a los distintos niveles de consumo eléctrico y a eventos puntuales.

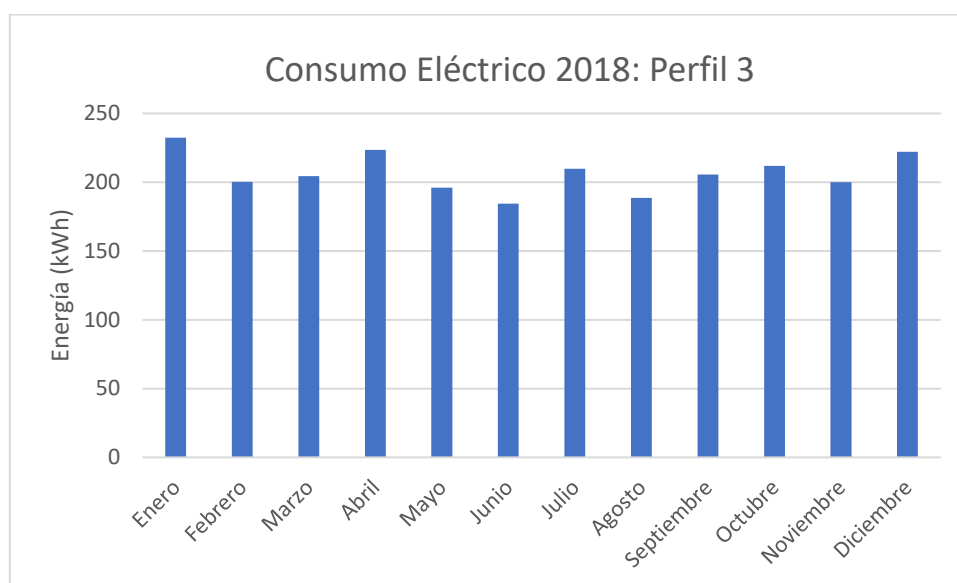


Ilustración 13: Consumo eléctrico 2018, Perfil 3

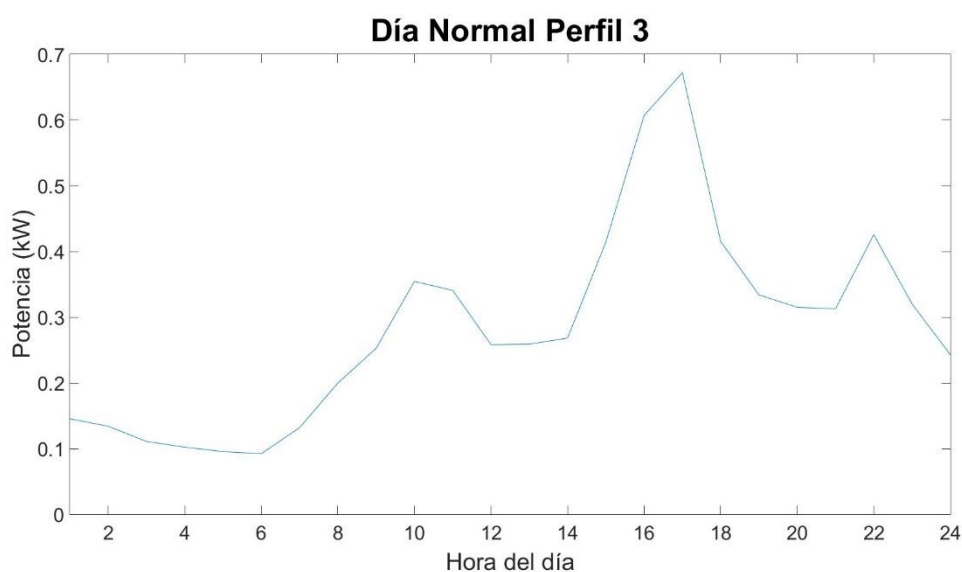


Ilustración 14: Día norma, Perfil 3

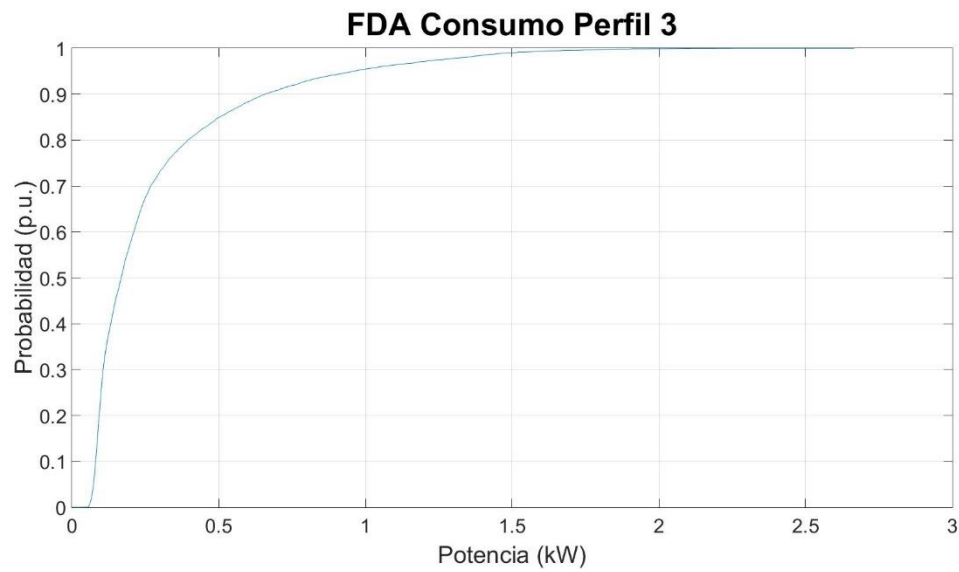


Ilustración 15: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 3

El 80% del tiempo no se superan los 0,4kW.

d) Perfil 4

- 4 adultos
- Calefacción eléctrica
- 2325 kWh/año
- Potencia contratada: 2,03 kW

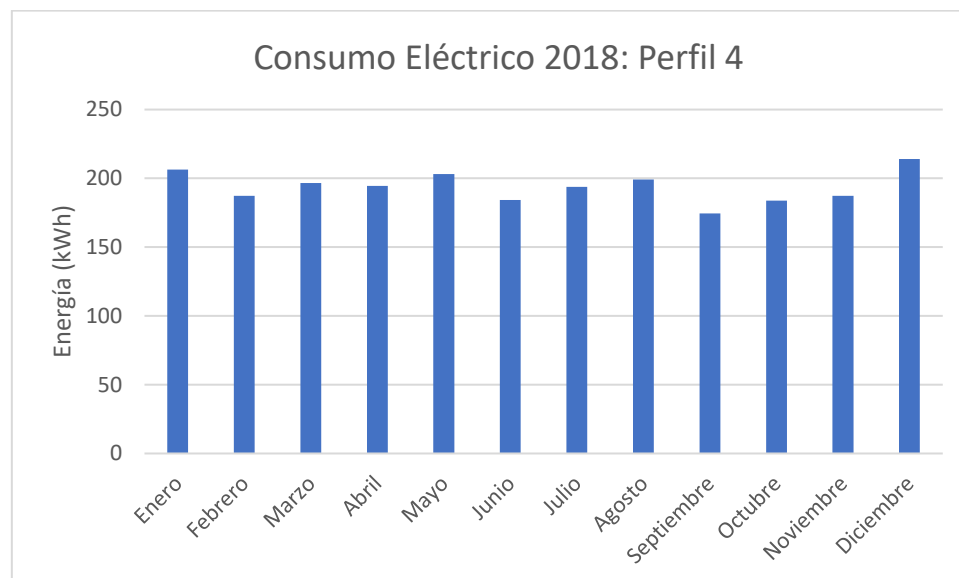


Ilustración 16: Consumo eléctrico 2018, Perfil 4

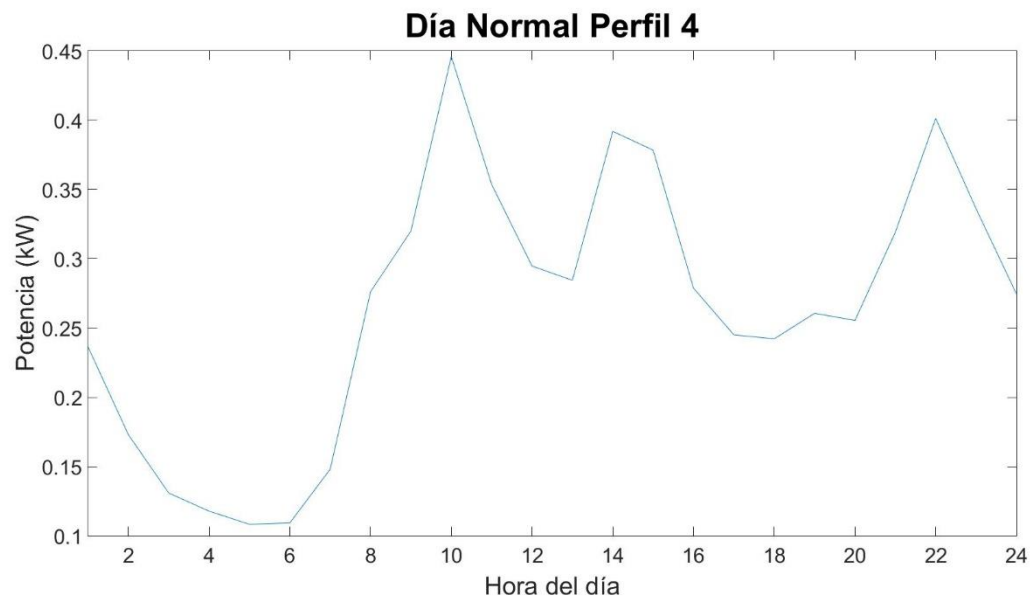


Ilustración 17: Día normal, Perfil 4

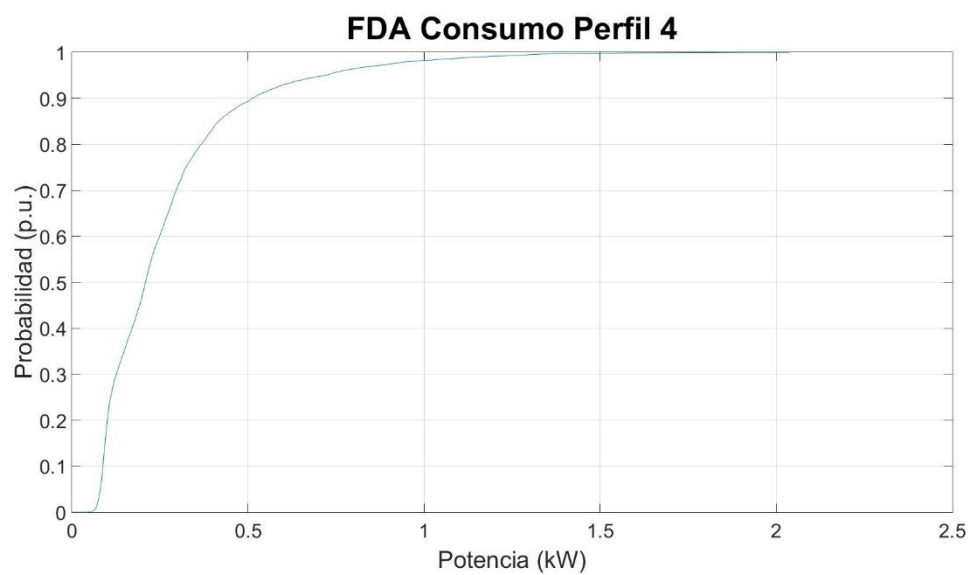


Ilustración 18: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 4

El 80% del tiempo no se superan los 0,37kW.

e) Perfil 5

- 1 adulto
- Calefacción gas
- 1148 kWh/año
- Potencia contratada: 1,91 kW

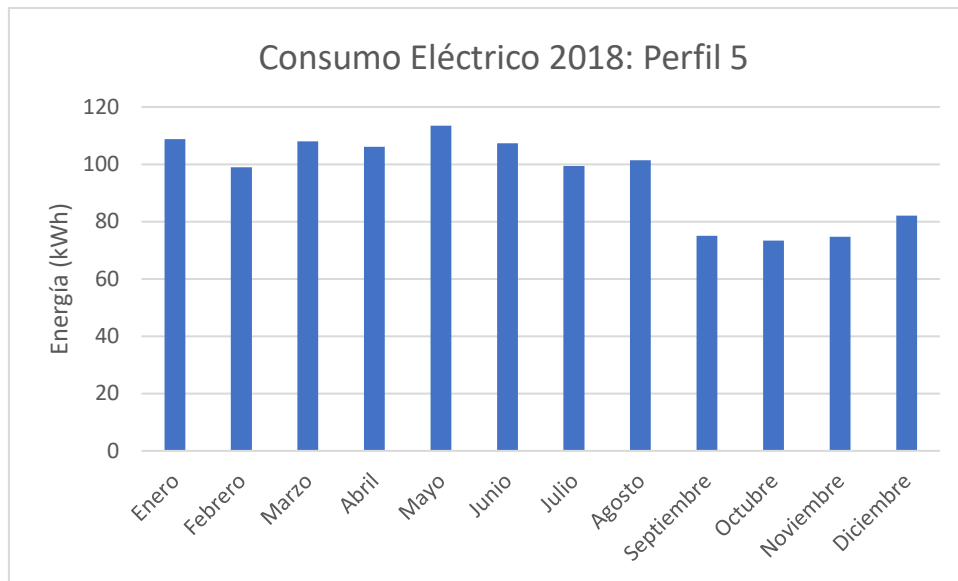


Ilustración 19: Consumo eléctrico 2018, Perfil 5

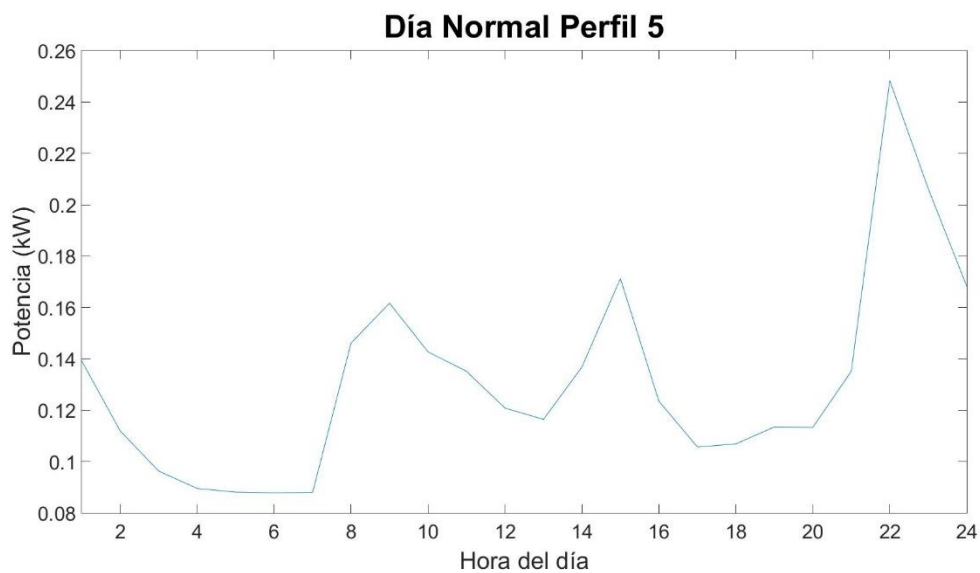


Ilustración 20: Día normal, Perfil 5

El 80% del tiempo no se superan los 0,152 kW.

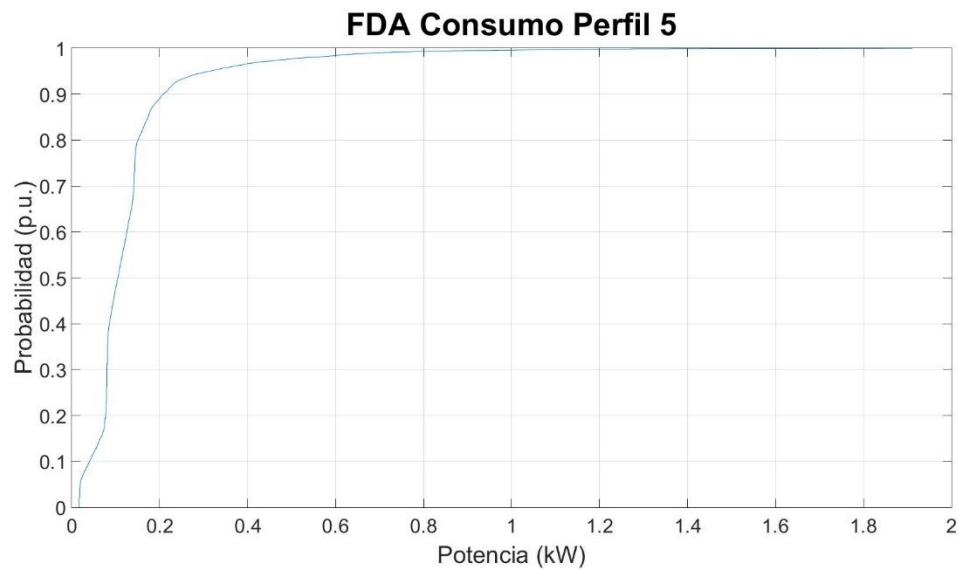


Ilustración 21: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 5

f) Perfil 6

- 4 adultos
- Calefacción gas
- 2493 kWh/año
- Potencia contratada: 2,87 kW

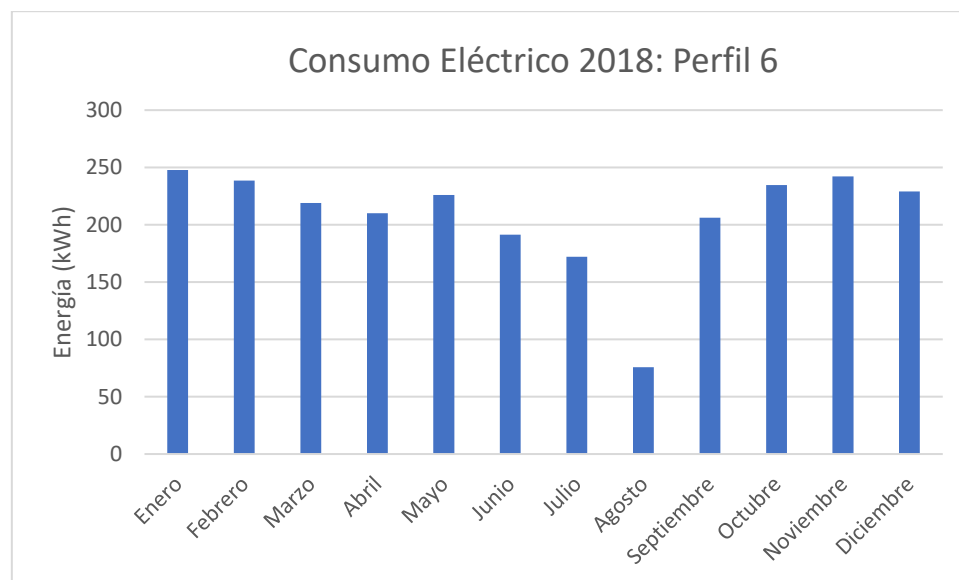


Ilustración 22: Consumo eléctrico 2018, Perfil 6

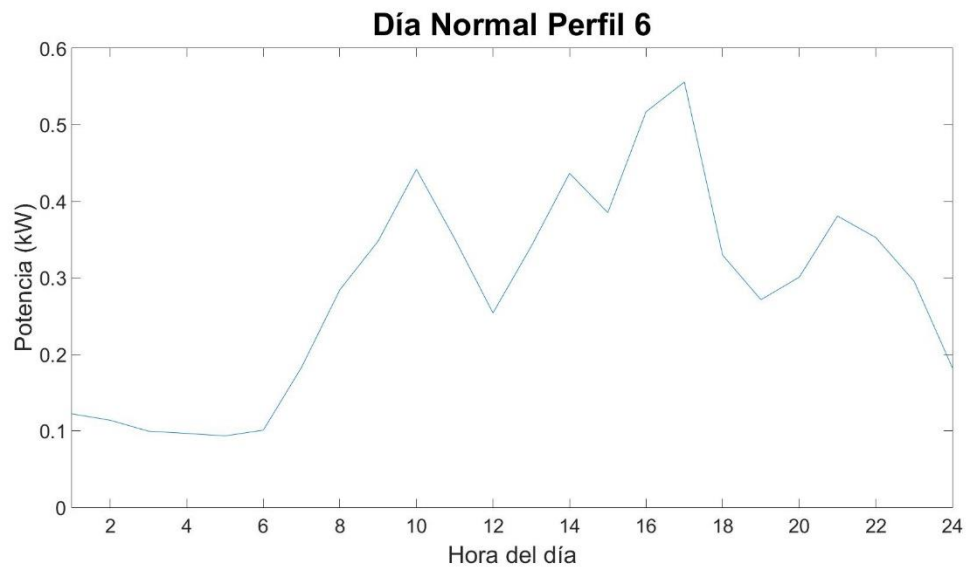


Ilustración 23: Día normal, Perfil 6

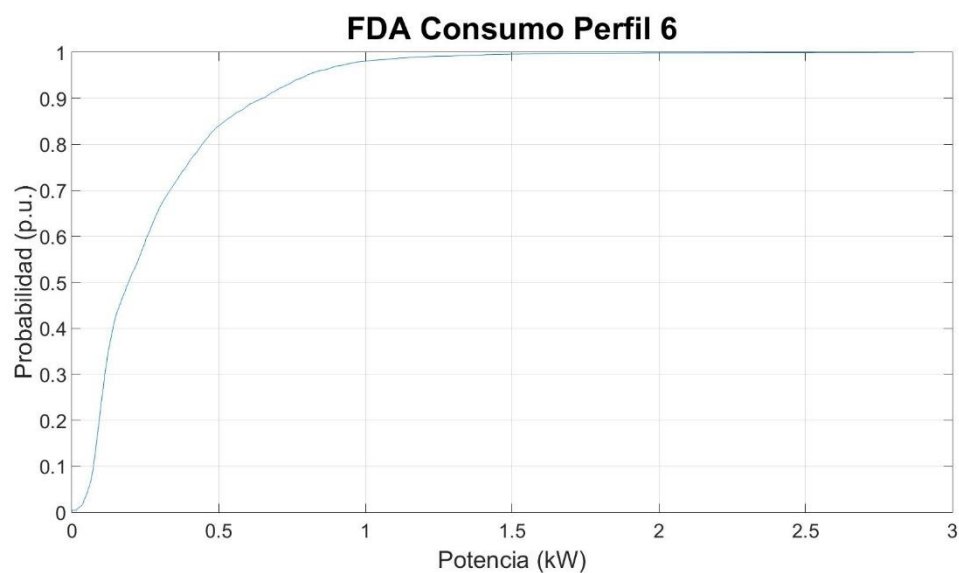


Ilustración 24: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico: Perfil 6

El 80% del tiempo no se superan los 0,45kW.

g) Perfil 7

- 1 adulto y 1 niño
- Calefacción de gas
- 3610 kWh/año
- Potencia contratada: 5,3 kW

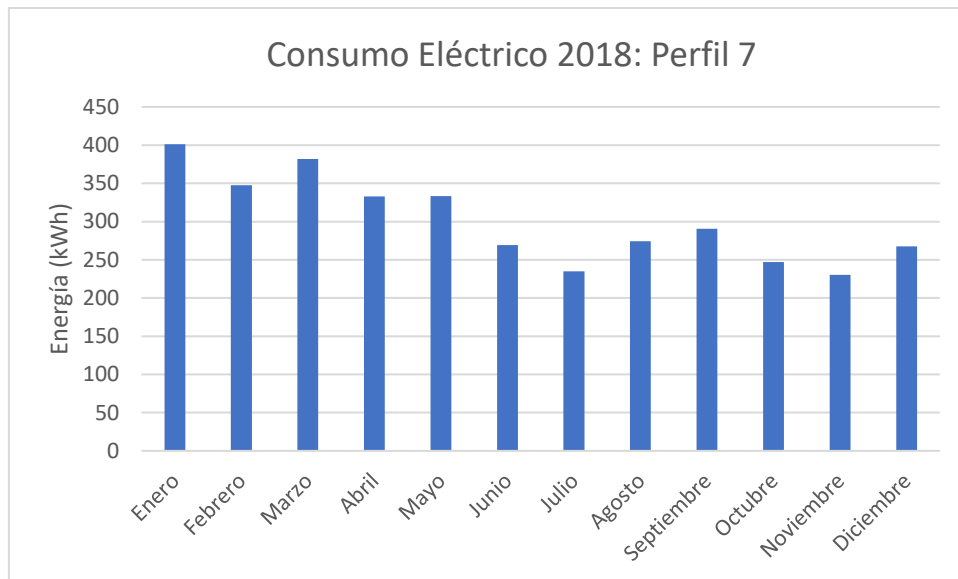


Ilustración 1: Consumo eléctrico 2018, Perfil 7

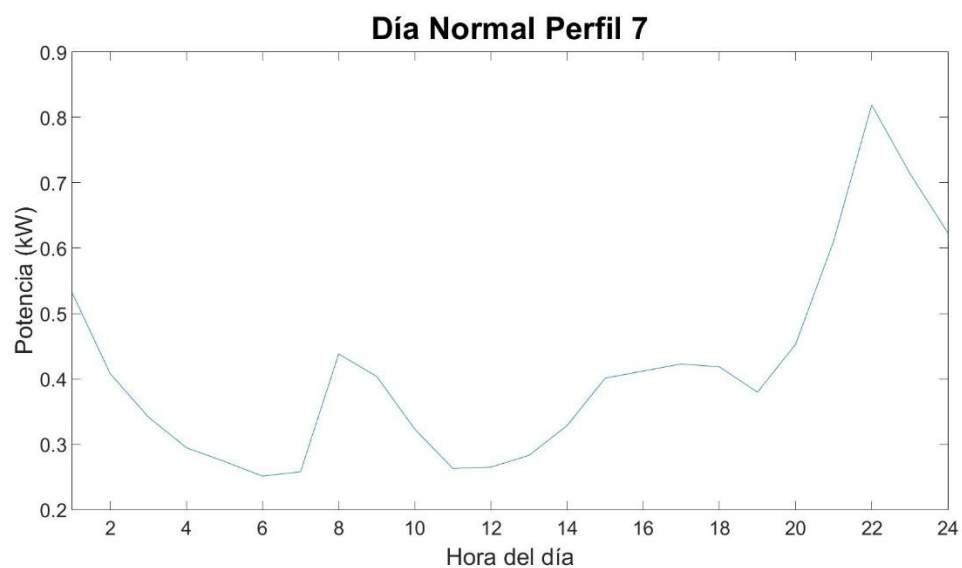


Ilustración 2. Día normal, Perfil 7

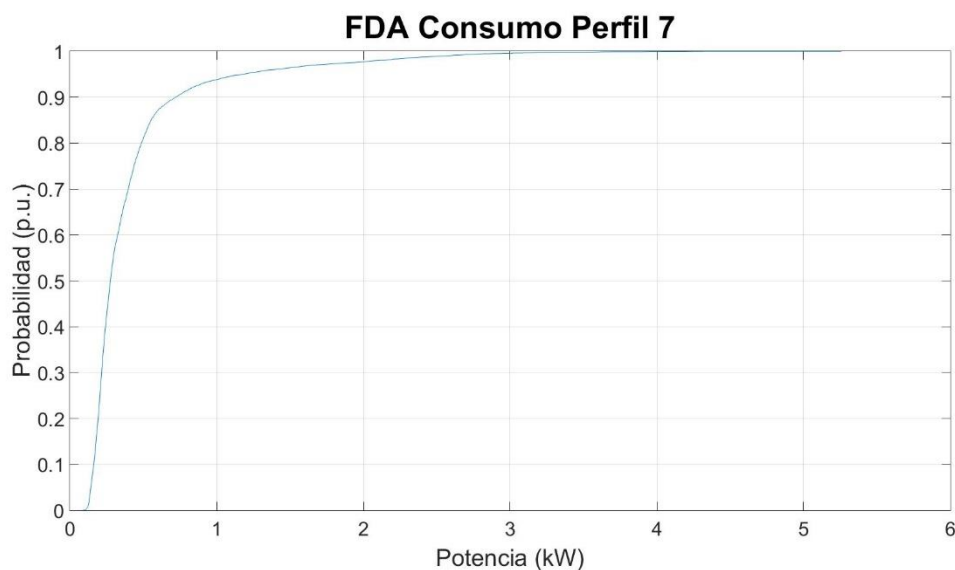


Ilustración 3: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 7

El 80% del tiempo no se superan los 0,5kW.

h) Perfil 8

- 3 adultos
- Calefacción de gas
- 4240 kWh/año
- Potencia contratada: 3,45 kW

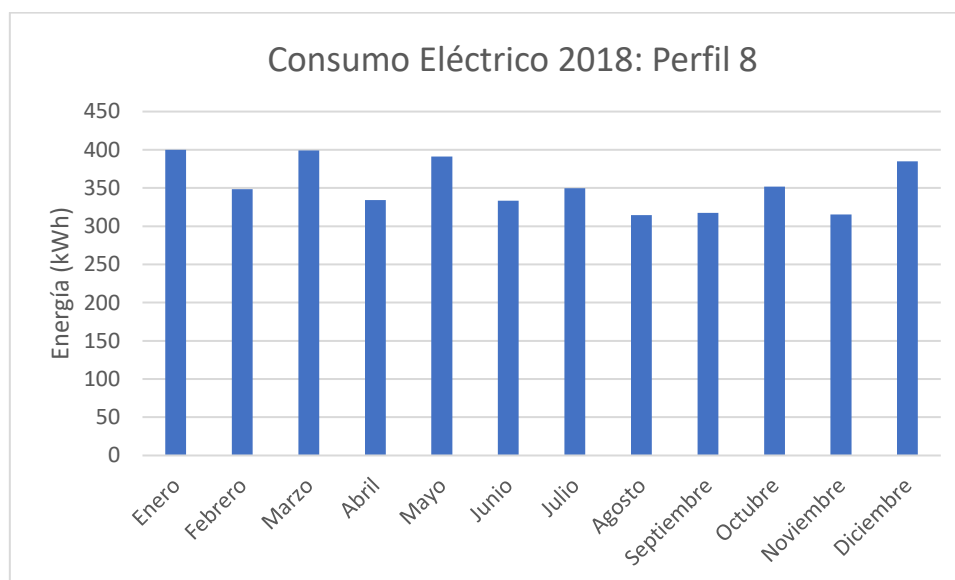


Ilustración 4: Consumo eléctrico 2018, Perfil 8



Ilustración 5: Día normal, Perfil 8

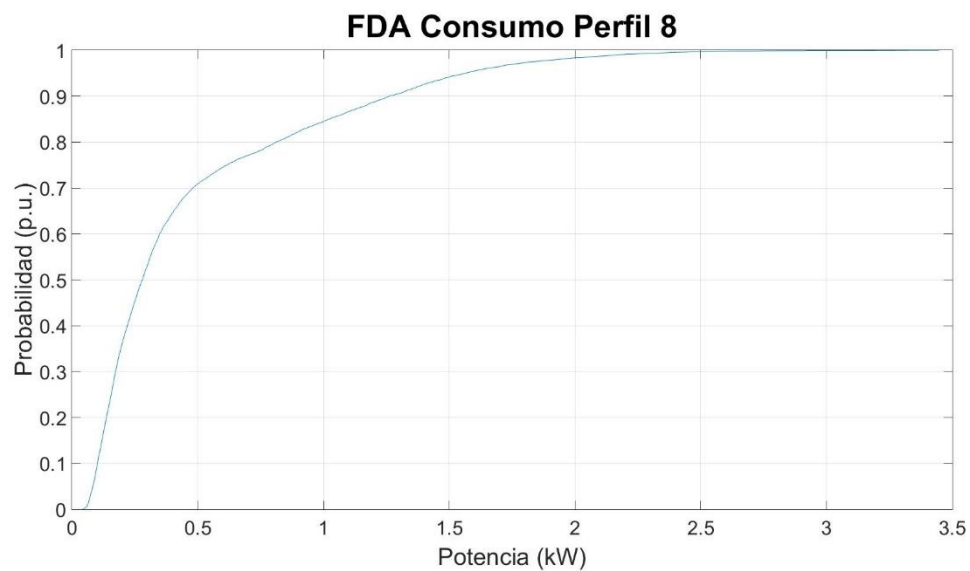


Ilustración 6: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 8

El 80% del tiempo no se superan los 0,8kW.

i) Perfil 9

- 2 adultos
- Calefacción de gas
- 2063 kWh/año
- Potencia contratada: 1,78 kW

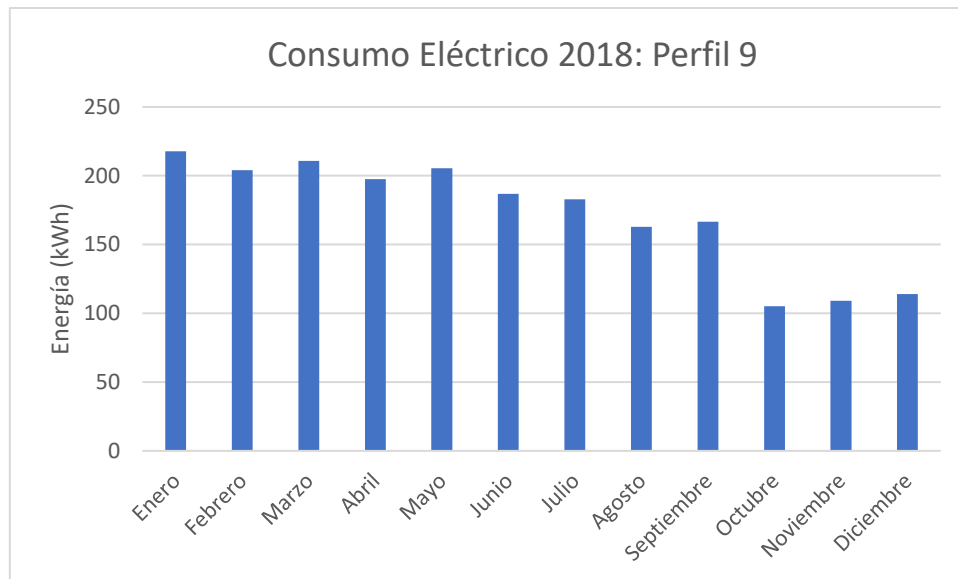


Ilustración 7: Consumo eléctrico 2018, Perfil 9

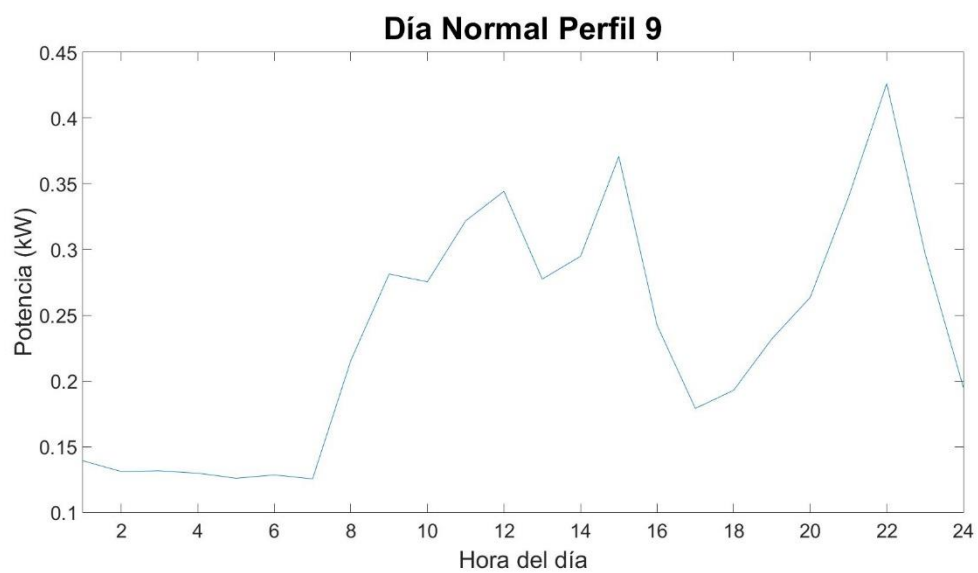


Ilustración 8: Día normal, Perfil 9

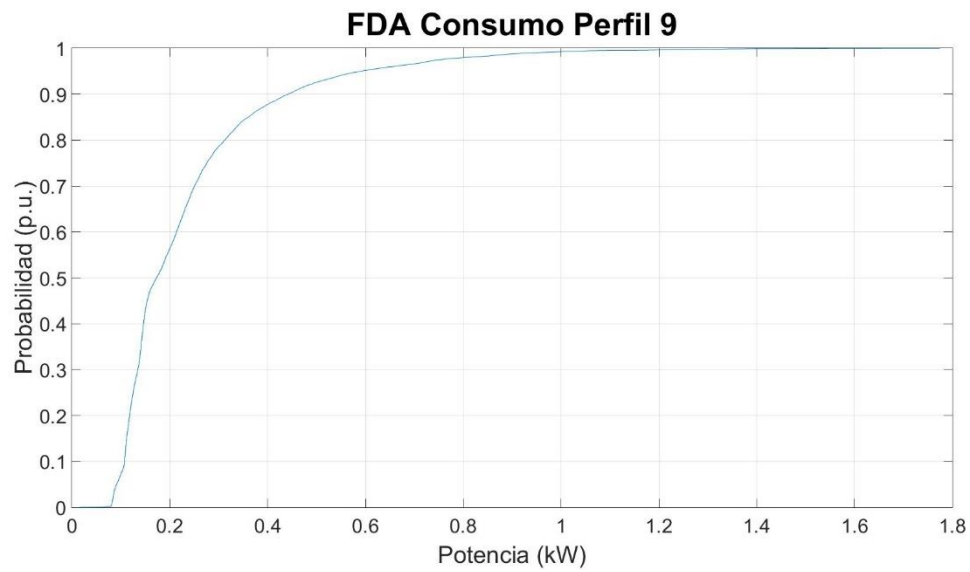


Ilustración 9: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 9

El 80% del tiempo no se superan los 0,3kW.

j) Perfil 10

- 2 adultos
- Calefacción central
- 3005 kWh/año
- Potencia contratada: 3,4 kW

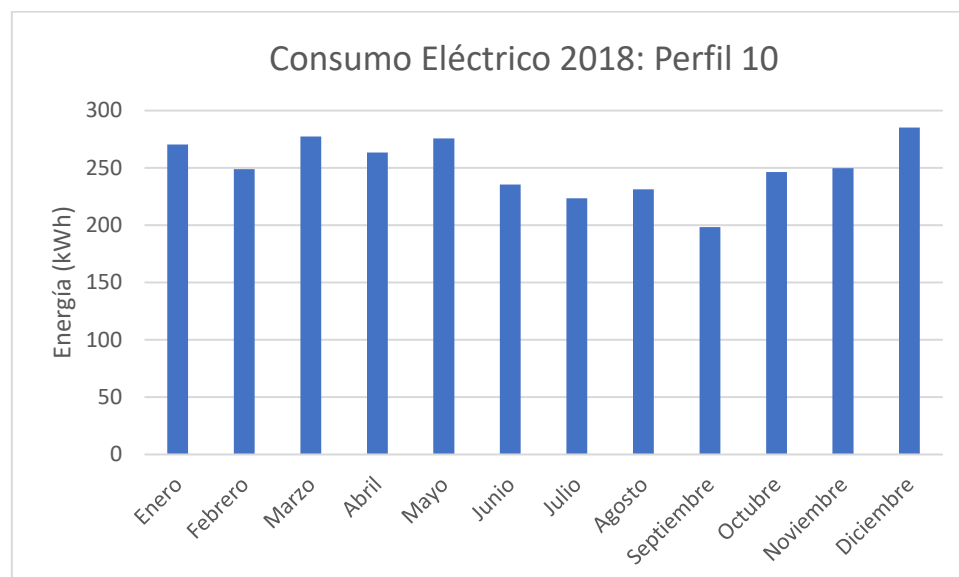


Ilustración 10: Consumo eléctrico 2018, Perfil 10

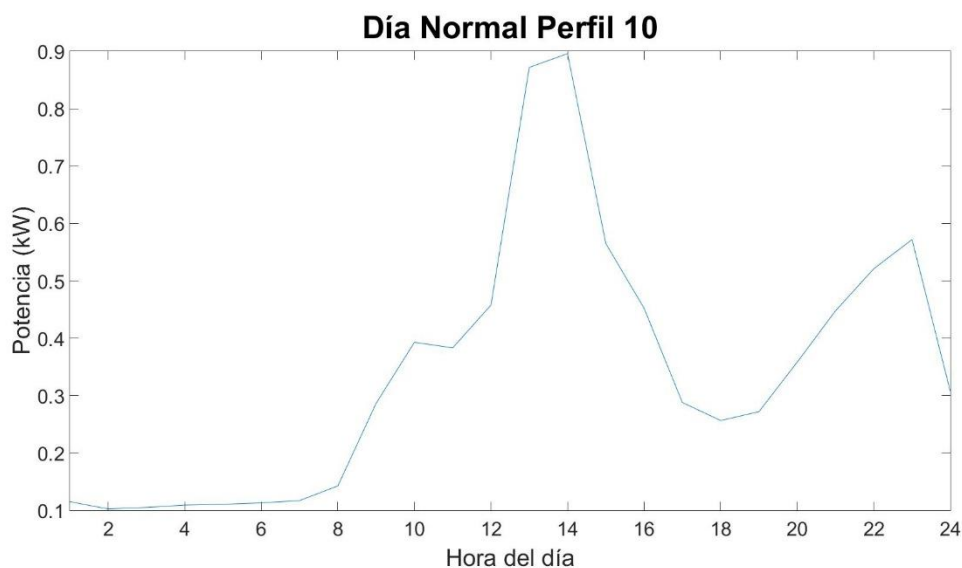


Ilustración 11: Día normal, Perfil 10

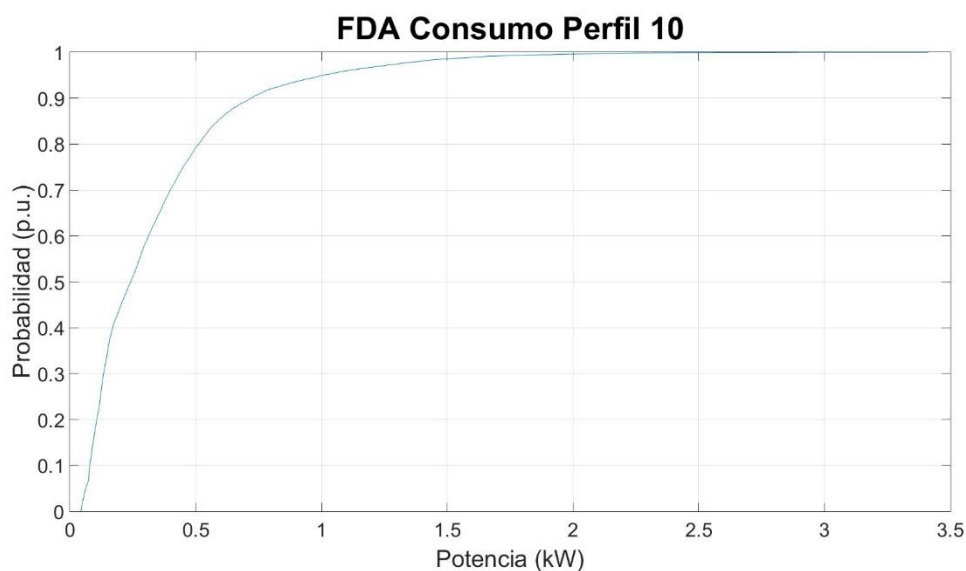


Ilustración 12: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Perfil 10

El 80% del tiempo no se superan los 0,5 kW.

2.1.1. Consumo total del conjunto de viviendas

El consumo total de las 10 viviendas y 30 personas es de 35.641 kWh/año.

La potencia contratada necesaria para el conjunto es de 14,5 kW.

El resultado de la suma de los consumos de todos los vecinos es evidente: La energía requerida en los meses de invierno es mayor por efecto de la vivienda 1 pero se ve algo atenuada como resultado del aumento relativo del consumo de verano respecto a invierno.

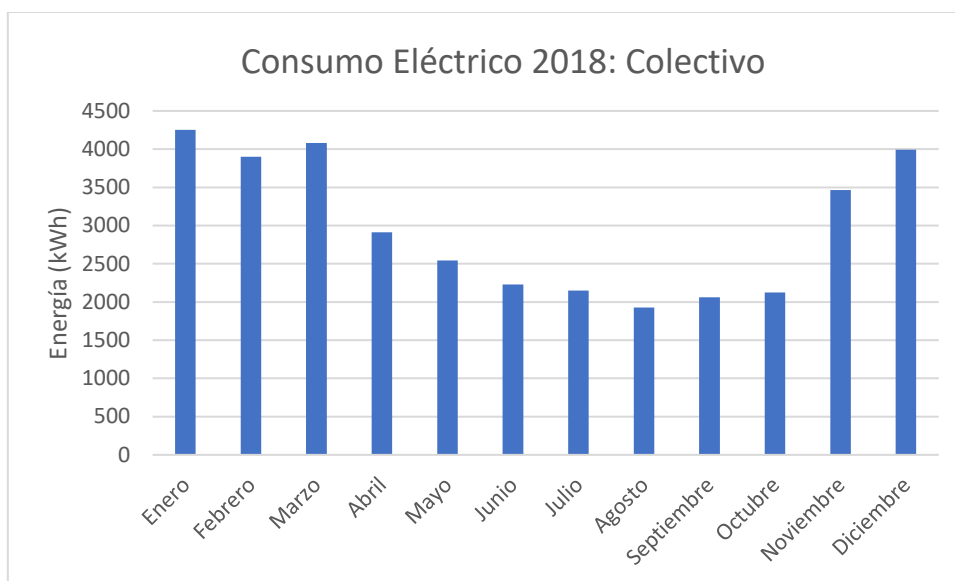


Ilustración 13: Consumo eléctrico 2018, Colectivo

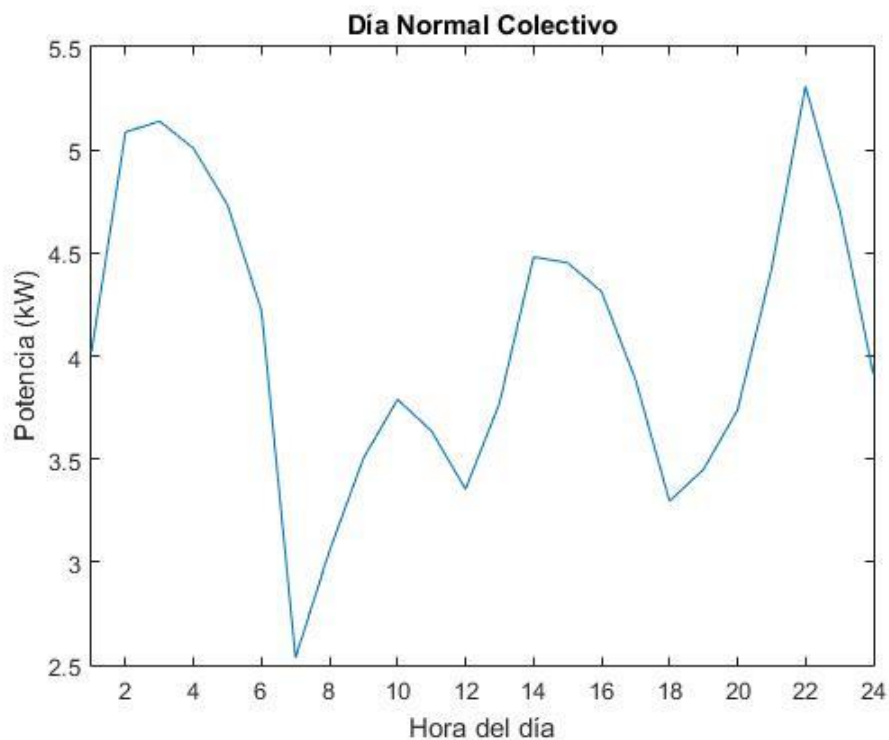


Ilustración 14: Día normal, Colectivo

Como se ha podido intuir en la mayoría de los perfiles de consumo diarios, hay tres picos de consumo durante el día. Estos se corresponden con las rutinas habituales de la sociedad española. El primer pico coincide con las horas previas al inicio de la jornada laboral, el segundo con la hora de comer y el tercero con la vuelta del trabajo y las tareas del hogar respectivamente. El pico de consumo de la madrugada se debe, una vez más, a la calefacción del vecino número 1.

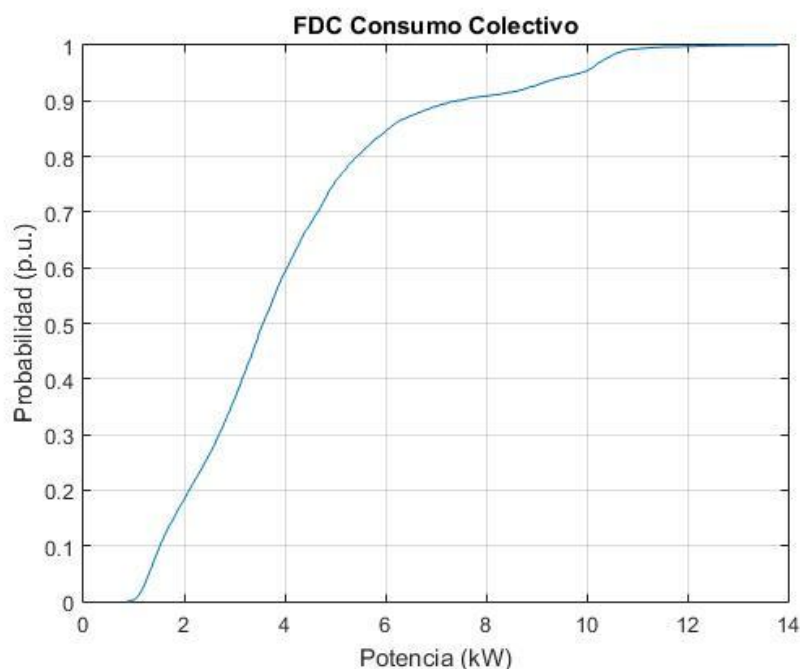


Ilustración 15: Función de distribución acumulada del consumo eléctrico, Colectivo

2.2. Influencia de las tarifas en la factura

Una de las variables a considerar más importantes en este estudio es la tarifa eléctrica contratada más adecuada para cada escenario. Por ello, ha sido necesario crear un script con “vectores tarifa” que nos permita aplicar a nuestros cálculos el precio de electricidad correcto para cada tarifa y momento del día.

Dentro de las posibilidades de la baja tensión existen diferentes tarifas que dependen de la potencia contratada y las de discriminaciones horarias que nos convenga aplicar. Desde la liberalización del mercado eléctrico, existen muchas alternativas a las comercializadoras convencionales, pero para realizar las simulaciones de costes, en este proyecto se van a emplear los precios de las tarifas de Iberdrola. Es probable que otras comercializadoras ofrezcan tarifas más competitivas pero el objeto de este apartado es comparar la rentabilidad del autoconsumo con distintas tarifas dentro de una misma comercializadora. También, han aparecido tarifas muy variadas que ofrecen adaptar las tarifas a nuestras planificaciones de consumo con cierta libertad, pero, una vez más, en este trabajo nos vamos a ceñir a las tarifas convencionales.

a) Tarifas 2.0A y 2.0DHA

Las tarifas 2.0 son aquellas que nos permiten contratar potencias inferiores a 10 kW. Son las más comunes debido a que el recargo que supone contratar potencias tan elevadas sin que sea necesario no compensa la reducción del precio de la energía que las tarifas de potencia superior ofrecen.

La tarifa 2.0A no establece una discriminación horaria, el precio de la energía es constante e independiente de la hora o el día del año [8].

La tarifa 2.0DHA discrimina en dos periodos o regímenes tarifarios distintos al día: periodo punta y periodo valle. El rango de horas que estos periodos abarcan también varía dependiendo de si es periodo verano o invierno. Este cambio de periodos se establece en la

fecha oficial de cambio de hora. En el caso de 2018, los cambios entre periodos se realizaron la madrugada del 25 de marzo y la del 28 de octubre. Durante el periodo de invierno, el periodo de precio reducido se acota entre las 22.00 y las 12:00. Por otro lado, en verano, este periodo se atrasa una hora. La ilustración 40 [9] muestra de forma gráfica estos periodos.

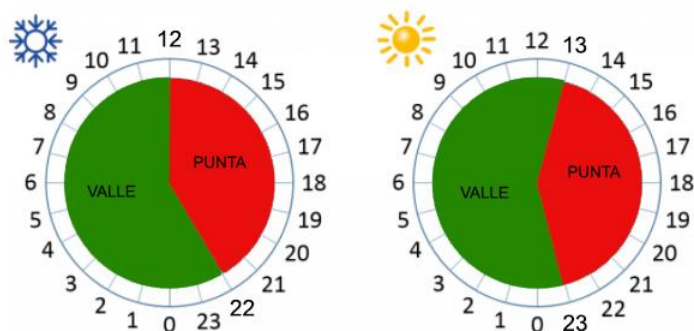


Ilustración 16: Periodos de discriminación horario 2.0 DHA

Fuente: Energía naranja

b) Tarifas 2.1A y 2.1DHA

Estas tarifas son análogas a las 2.0 solo que para el rango de potencia contratada comprendido entre los 10 y los 15 kW [10].

c) Tarifa 3.0

Para poder acogerse a la tarifa 3.0 es necesario contratar una potencia superior a los 15 kW. Esta tarifa efectúa una discriminación horaria en tres periodos: punta, valle y llano. El periodo valle abarca entre la 24:00 y las 8:00 tanto en invierno como en verano. El rango del periodo punta es desde las 18:00 y las 22:00 en invierno y entre las 11:00 y las 15:00 en verano. El resto de las horas se consideran periodo llano. La ilustración 41 [8] ayuda a visualizar estos periodos [11].

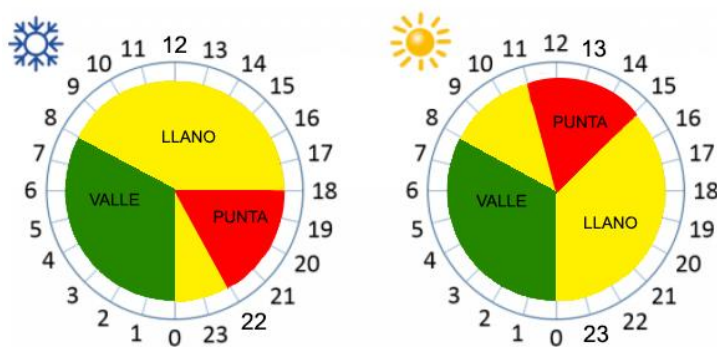


Ilustración 17: Periodos de discriminación horario 3.0

Fuente: Energía Naranja

Una vez se supera la necesidad de contratar una potencia superior a los 15 kW, esta tarifa es muy ventajosa para viviendas con consumos eléctricos mayores en los periodos valle, como el caso de la vivienda 1 que, al utilizar acumuladores eléctricos con horario nocturno, en invierno concentra el grueso de su consumo en estos periodos. No obstante, para viviendas que cuenten con autoconsumo, también es muy interesante esta tarifa al coincidir los periodos de precio bajo con las horas de menor recurso solar.

Una vivienda con autoconsumo fotovoltaico es totalmente dependiente en las horas nocturnas y es cuando más conviene que el precio de la energía sea bajo. Si durante los periodos de luz la vivienda es relativamente autosuficiente y hace un consumo reducido de energía, los precios más elevados de los periodos punta no deberían inflar en exceso a la factura.

La tarifa 3.0 también permite contratar una potencia distinta para cada uno de los periodos y el término fijo a la hora de facturar la potencia contratada puede variar obedeciendo a las siguientes reglas [11]:

- Si la potencia utilizada durante un periodo concreto y a lo largo del mes no ha superado el 85% de la potencia contratada, solo se facturará el 85% de esta.
- Si la potencia utilizada es superior al 85% e inferior al 105% de la potencia contratada, se facturará la potencia contratada.
- Si la potencia utilizada es superior al 105% de la potencia contratada, se facturará la potencia consumida más la diferencia de esta respecto al 105% de la contratada.

Esta regla puede ser ventajosa considerando lo siguiente: el conjunto de viviendas no supera a lo largo de todo el año los 13,8 kW de potencia por lo que la potencia contratada para los tres periodos de esta tarifa será el mínimo, 15 kW. El 85% de esta potencia es 12,75 kW y esta potencia se sobrepasó en 5 ocasiones durante 2018. Las 5 puntas de consumo mostradas en la ilustración 42 se distribuyeron en 4 meses distintos, superaron el 85% de la potencia contratada pero no el 105%.

En conclusión, acogiéndose a la tarifa 3.0, la facturación de potencia contratada a la comunidad de vecinos será de 12,75 kW para los periodos punta y llano de todo el año y para ocho meses de periodos valle y de 15 kW en los periodos valle de los cuatro meses restantes.

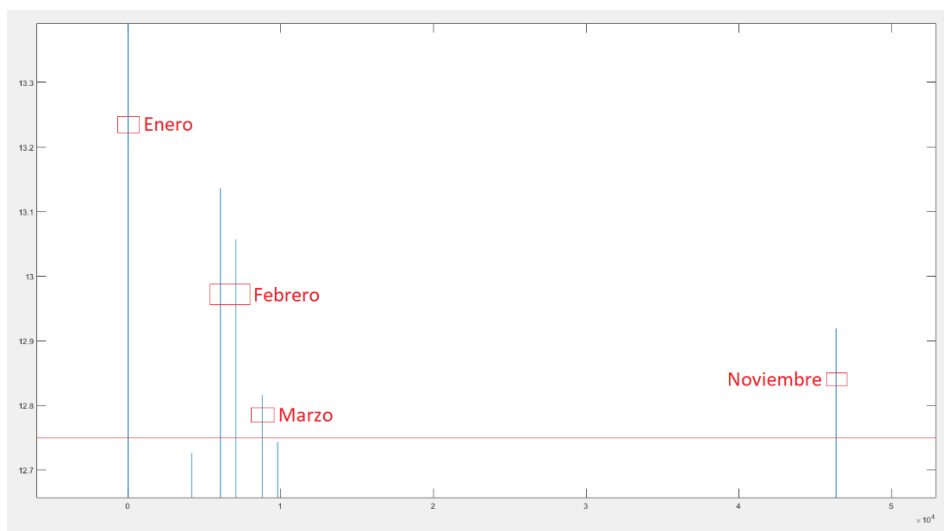


Ilustración 18: Picos de potencia de la comunidad en 2018, valores superiores al 85% de la potencia

d) Tarifa PVPC

Con la tarifa PVPC se establecen 24 precios correspondientes a cada una de las horas del día. Estos son los que fija el mercado mayorista y son publicados en la web del Red Eléctrica de España (REE) en torno a las 20:30 de cada día [12].

El precio de la electricidad es el que se fija en el mercado mayorista, los usuarios tienen que planificar su consumo de forma diaria para facturar a las horas más baratas y conseguir un

ahorro significativo en la factura de la luz. En determinados casos, el cliente tiene plena posibilidad de adecuar sus hábitos de consumo a las horas más económicas.

La principal desventaja que supone tener contratada esta es que dificulta la capacidad de planificación del consumo del cliente, puesto que cada hora del día tiene un precio que cambia al día siguiente.

Esta tarifa ha sido descartada de las opciones a simular debido a la naturaleza variable de sus precios y la imposibilidad de programar un sistema arbitrario.

e) Resumen de tarifas

Como se ha indicado al comienzo del apartado, la comparación se va a realizar entre distintas tarifas de una única comercializadora, Iberdrola. Los costes de energía y de potencia contratada utilizados en este trabajo han sido los mostrados en la tabla 1 [8] [10] [11]. Estos valores se han obtenido de la web Tarifa Luz Horaria, una página de la asesora energética Selectra.

Tarifa		Término de energía (€/kWh)	Término de potencia (€/kW año)	Potencia contratada
2.0A		0,1349	45	Menor a 10 kW
2.0DHA	Punta	0,165323	42,04	Menor a 10 kW
	Valle	0,086565		
2.1A		0,1399	50,01	Menor a 15 kW
2.1DHA	Punta	0,169602	49,44	Menor a 15 kW
	Valle	0,105421		
3.0	Punta	0,1278	42,2	Mayor a 15 kW
	Valle	0,0831	18,2114	
	Llano	0,11017	25,601	

Tabla 1: Costes de tarifas eléctricas

Fuente: Selectra

Las tarifas 2.1 son muy parecidas a las 2.0. La diferencia principal es que las tarifas 2.1 son para potencias contratadas comprendida entre los 10 y 15 kW [10]. La tarifa 2.1 no supone ningún beneficio frente a las 2.0 ya que los términos de energía y de potencia son más caros. Esta opción está dirigida a viviendas con grandes consumos energéticos y el aumento de los precios se justifica un mayor coste de mantenimiento e infraestructuras de los puntos de acceso a las viviendas. Dado que para ninguno de los vecinos es necesario contratar individualmente potencias superiores a 10 kW, esta tarifa no va a estar sujeta a simulaciones.

Para poder valorar el ahorro de las distintas estrategias, primero es necesario calcular el gasto de las viviendas sin potencia fotovoltaica instalada y contrastar con diferentes tarifas. Los costes variarán por la diferencia en los costes de la energía y por el coste de la potencia contratada.

Los costes de energía y de potencia contratada utilizados en este trabajo han sido los mostrados en la tabla a continuación. Estos valores se han obtenido de la web Tarifa Luz Horaria, una página de la asesora energética Selectra.

Las funciones de coste de energía de estas tarifas son muy sencillas, ya que, la tarifa 2A es plana y la 2DHA solo distingue dos regímenes horarios. Por ello, una será más rentable que la otra en función de la distribución del consumo de energía en estos dos periodos.

Funciones de costes de las tarifas:

$$C_{2A} = 0.1349 E_T \quad (1)$$

$$C_{2DHA} = 0.0866 E_V + 0.1653 E_P \quad (2)$$

$$E_T = E_V + E_P \quad (3)$$

Donde C_{2A} y C_{2DHA} son los costes en euros (€/kWh) de la energía consumida con las tarifas 2A y 2DHA respectivamente. E_T , E_V y E_P son los consumos de energía en kWh. El subíndice T indica energía total y el V y el P la energía consumida durante el periodo valle y punta respectivamente.

Igualando las funciones 1 y 2 encontramos el límite donde las tarifas resultan igual de económicas:

$$0.1349 E_T = 0.0866 E_V + 0.1653 E_P \quad (3)$$

$$E_V = 0.6295 E_P \quad (4)$$

$$\frac{E_V}{E_T} = 0.3863 \rightarrow 38.63\% \quad (5)$$

Con que el consumo de energía de la vivienda durante el periodo valle sea superior al 38.63% de la energía total, esta tarifa resulta más rentable.

En cuanto al término fijo, en el caso de la tarifa 2DHA, es de 42.04 €/kW año, frente a los 45€/kW año de la tarifa 2A. La diferencia de este coste entre las dos tarifas es pequeña y tiene más peso el coste de la energía, pero es una ventaja más.

En la práctica, se han aplicado estos precios a los consumos de las distintas viviendas.

Los resultados, aun previsibles, son muy ilustrativos ya que permite reafirmar la evidente ventaja de la tarifa 2.0 DHA. También resalta como la tarifa 3.0 solo es viable para viviendas con consumos altos y grandes demandas de potencia. Véanse estos resultados en la ilustración 44.

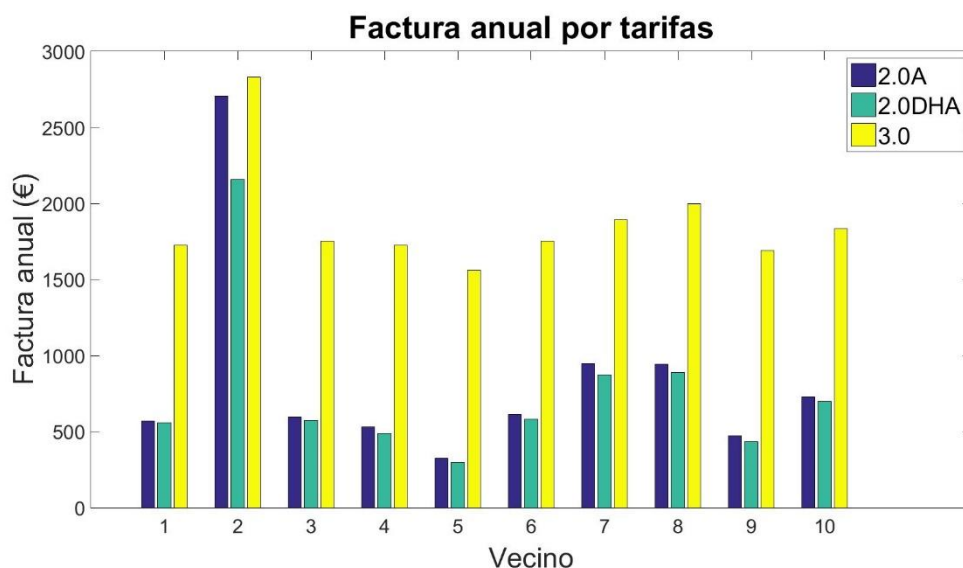


Ilustración 19: Comparación de las distintas facturas anuales para cada vecino

La tarifa 2.0A es una tarifa plana con un precio de energía invariable, pero, como se muestra en la tabla 2, a final de año el coste de esta es más elevado que la 2.0DHA en todos los casos estudiados. De ahora en adelante la tarifa 2.0A queda descartada y no se tendrá en cuenta en posteriores simulaciones.

Factura anual (2018)			
Vecino	Tarifa 2A	Tarifa 2DHA	Tarifa 3
Perfil 1	571,20 €	567,28 €	1.744,34 €
Perfil 2	2.707,73 €	2.173,45 €	2.870,76 €
Perfil 3	596,58 €	582,14 €	1.777,13 €
Perfil 4	531,10 €	493,54 €	1.745,38 €
Perfil 5	323,61 €	298,08 €	1.570,82 €
Perfil 6	611,60 €	587,84 €	1.777,27 €
Perfil 7	947,76 €	882,72 €	1.920,62 €
Perfil 8	944,70 €	899,51 €	2.038,44 €
Perfil 9	472,23 €	441,70 €	1.707,87 €
Perfil 10	730,96 €	704,61 €	1.854,51 €

Tabla 2: Valores de las distintas facturas anuales para cada vecino

La ilustración 45 muestra la curva de consumo habitual o “día normal” del conjunto de vecinos excluyendo al perfil 2, la vivienda de altos consumos eléctricos en horario nocturno. También se ha sombreado el periodo punta en rojo y el valle en verde para poder entender mejor la diferencia entre las tarifas mencionadas.

En la ilustración 45 se observa como la mayor demanda energética ocurre en el periodo punta, cuando el precio de la energía es mayor. Sin embargo, como hemos comprobado en la tabla 2, todos los vecinos se veían beneficiados contratando esta tarifa frente a la tarifa sin discriminación horaria. Esto se debe a que el consumo energético durante el periodo valle para la media de los vecinos es del 39%. No debe pasar por alto que el periodo valle abarca catorce horas del día frente a las diez del periodo punta y que, además, hay horas de este periodo en el que los consumos también son notables, como en las primeras horas de la mañana y las últimas del día.

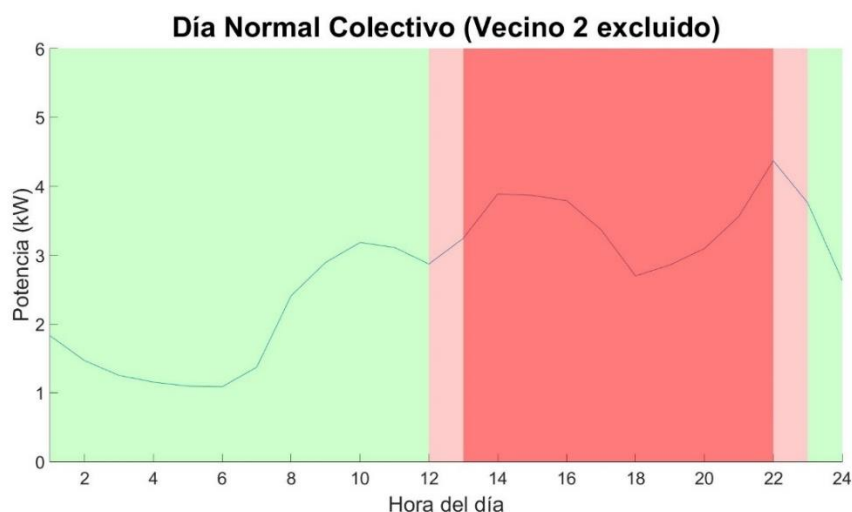


Ilustración 45: Distribución del consumo eléctrico medio de los vecinos en los distintos regímenes tarifarios, tarifa 2.0 DHA (Perfil 2 excluido)

La ventaja es aún más obvia cuando se evalúa el perfil 2 debido a que este vecino realiza el 75% de su consumo en el periodo valle, véase la ilustración 46. Entre las 23:00 y las 8:00, este vecino emplea la mayoría de su consumo energético en cargar los acumuladores de calefacción eléctrica. Este método es una forma clásica de reducir costes cuando se emplea calefacción eléctrica. Estos transforman la energía eléctrica en calor y ayudan a mantener la inercia térmica de un material refractario aislado en un sistema teóricamente adiabático. De esta forma el usuario puede acumular la energía en forma de calor cuando el coste de la electricidad es menor y liberar el calor cuando sea necesario.

Sin embargo, no es la opción más económica. Una alternativa común son las bombas de calor que, al tener eficiencias superiores a la unidad, sacan mayor partido a la energía a la hora de calefactar la casa. Por otro lado, la calefacción derivada de combustibles fósiles sigue siendo una de las opciones más empleadas en España.

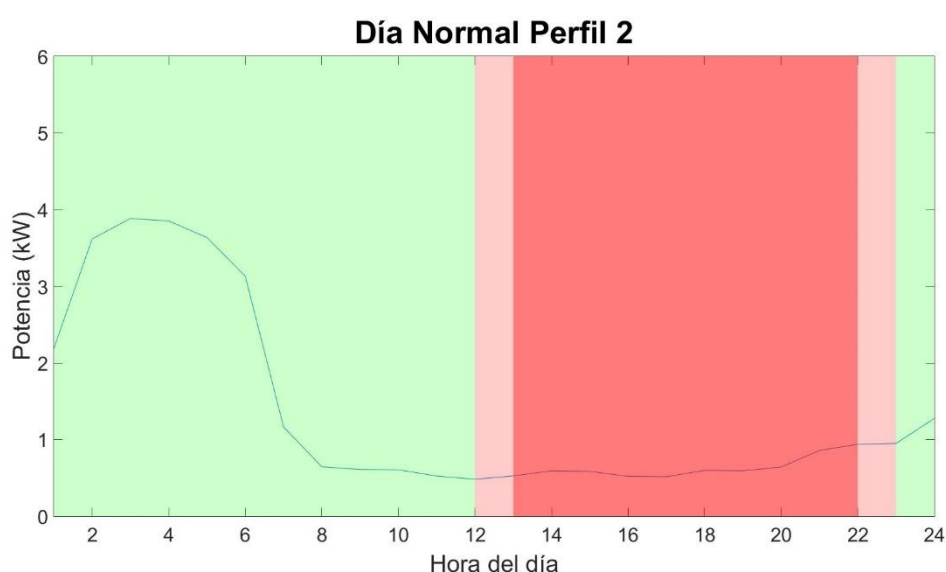


Ilustración 46: Distribución del consumo eléctrico medio de perfil 2, tarifa 2.0 DHA

Como ya se ha mencionado, contratar la tarifa 3.0 de forma individual no es una opción viable debido al alto precio del término fijo. En la tabla 3 se puede comprobar que el término fijo que pagan todos los vecinos es el mismo. Esto se debe al requerimiento de contratar una potencia mínima de 15 kW para poder acogerse a esta tarifa. Si los vecinos se agruparan como una sola entidad de consumo podrían acogerse a esta variedad de tarifa repartiendo el coste del término fijo entre todo el colectivo.

Factura anual Tarifa 3.0			
Vecino	Total	Término	Coste término
Perfil 1	1.744,34 €	TV	337,81 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 2	2.870,76 €	TV	1.464,24 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 3	1.777,13 €	TV	370,61 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 4	1.745,38 €	TV	338,85 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 5	1.570,82 €	TV	164,29 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 6	1.777,27 €	TV	370,75 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 7	1.920,62 €	TV	514,10 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 8	2.038,44 €	TV	631,92 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 9	1.707,87 €	TV	301,34 €
		TF	1.394,80 €
Perfil 10	1.854,51 €	TV	447,98 €
		TF	1.394,80 €

Tabla 3: Factura anual con la tarifa 3.0 desglosada por términos

En las ilustraciones 47 y 48 se han las curvas de consumo normal de todos los vecinos agrupados y el consumo individual del perfil 2. La mayor parte del consumo y por influencia del perfil 2, ocurre durante el periodo valle que se muestra en verde. Esto beneficia especialmente al perfil 2 y no tanto al conjunto de vecinos. Sin embargo, durante el periodo llano, mostrado en amarillo, el consumo energético ha adquirido un perfil más homogéneo que las curvas de cada uno de los vecinos por separado. Por otro lado, pese a que durante el periodo punta hay un pico de consumo notable, hay que recordar que el precio de esta tarifa durante este periodo es más reducido que en las evaluadas anteriormente.

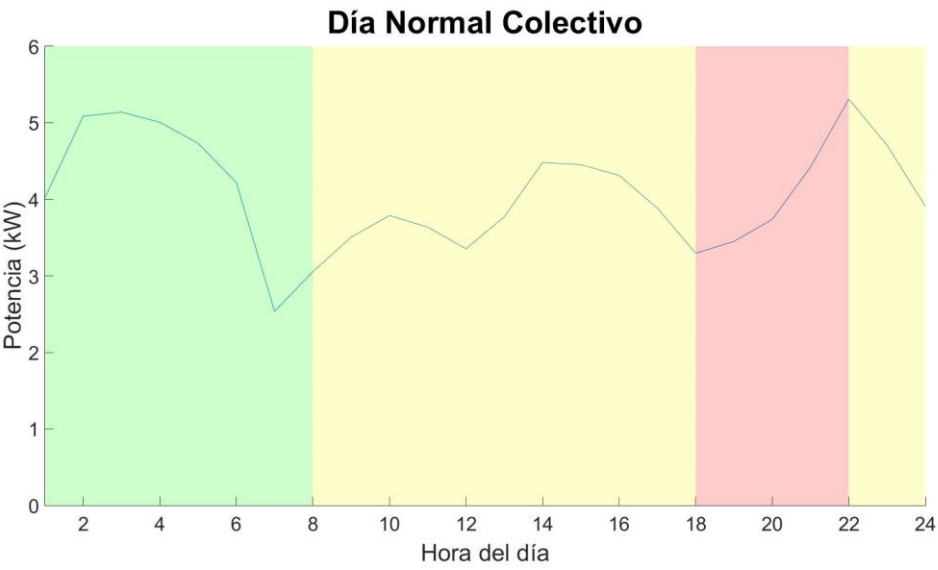


Ilustración 47 Distribución del consumo eléctrico medio de los vecinos en los distintos regímenes tarifarios, tarifa 3.0

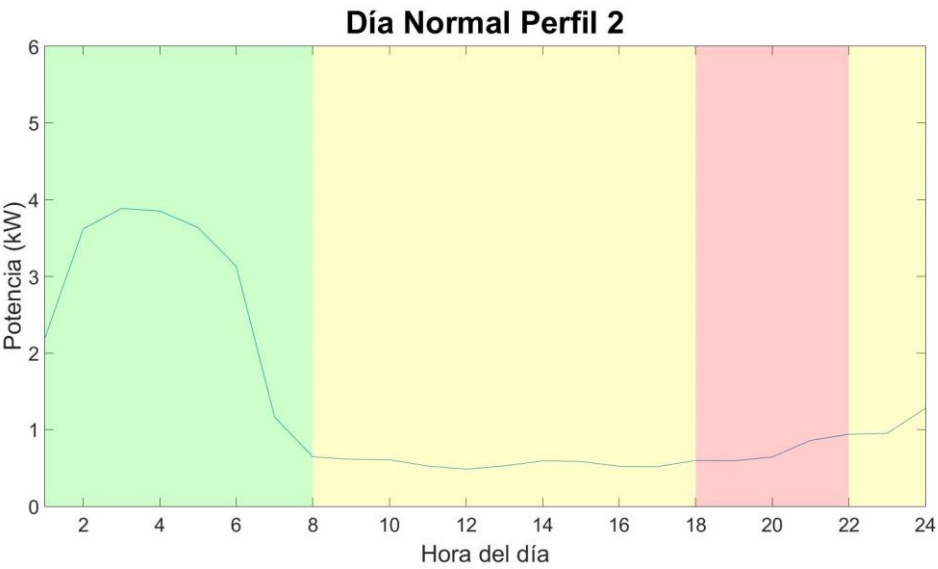


Ilustración 48: Distribución del consumo eléctrico medio del perfil 2 en los distintos regímenes tarifarios, tarifa 3.0

2.3. Recurso solar

2.3.1. Localización y climatología

La localización del bloque de viviendas objeto es la siguiente:

- Área: Comarca de Pamplona
- Provincia: Navarra
- Latitud: 42°47'06.2"N
- Longitud: 1°41'30.9"W
- Altitud: 443m

La climatología de Zizur Mayor es prácticamente la misma de la de su capital, Pamplona, pues está a solo unos 4 km de ésta.

Su clima se puede definir como suboceánico, marítimo de costa occidental Cf2b con dos meses relativamente secos, según Köppen. Véase la clasificación de climas de Navarra en la ilustración 49. Los climas del grupo C, o de climas templados, se caracterizan por ser húmedos con temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C, y la del mes más cálido supera los 10°C. Concretamente el subgrupo Cf2b es un clima templado de veranos frescos, las lluvias están bien repartidas a lo largo de todo el año, por lo que no existe una estación especialmente seca [13].

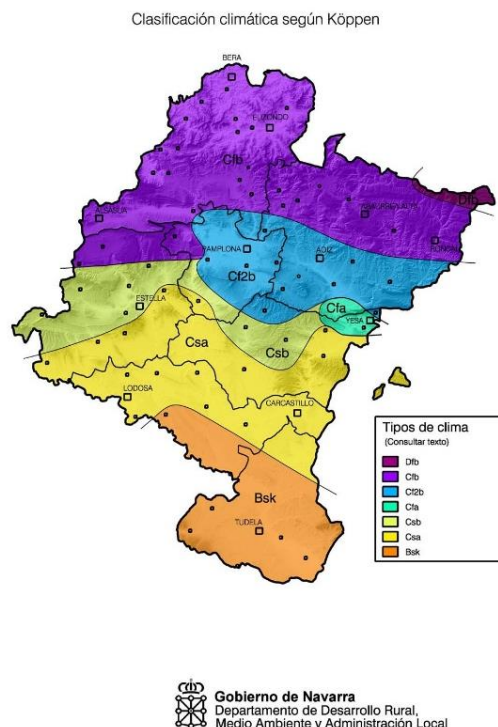


Ilustración 49: Zonas climáticas de Navarra
Fuente: Gobierno de Navarra

La altura solar al mediodía oscila entre los 24° en el solsticio de invierno hasta los 71° en el de verano, tal y como se ve en la ilustración 50 [14]. Bajo estas condiciones, la inclinación óptima en esta localización es de 35°, según el photovoltaic geographical information system (PVGIS) de la comisión europea. Por otro lado, el ángulo azimutal óptimo es de -1° SE.

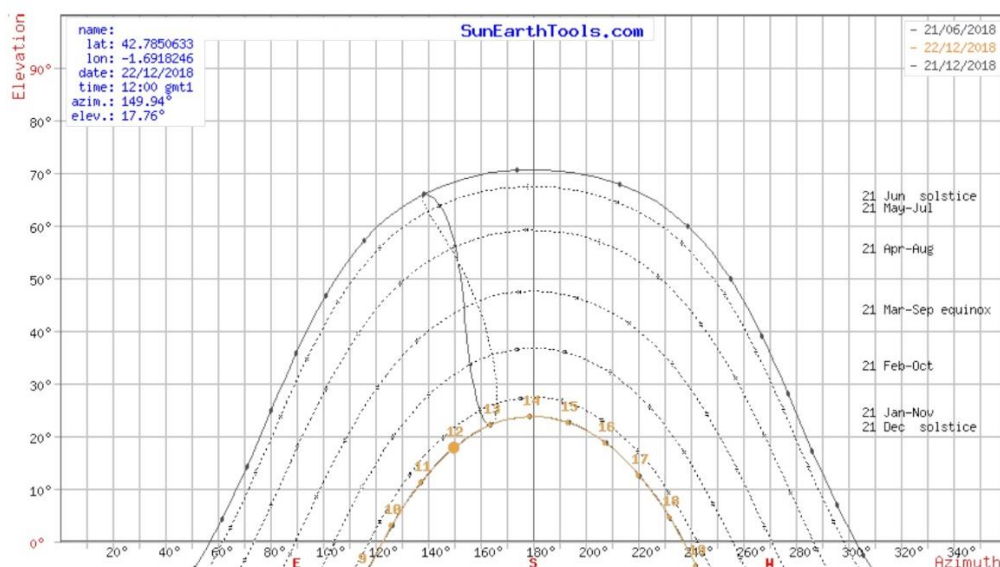


Ilustración 50: Trayectorias solares de Zizur Mayor.

Fuente: SunEarthTools.com

Según el PVGIS, la orientación óptima en esta localización es de 2° hacia el este respecto al sur y 36° de inclinación [15]. Bajo esas condiciones y unas pérdidas totales del sistema de aproximadamente el 14%, el PVGIS estima una generación anual de 1370 kWh por cada kWp de potencia fotovoltaica instalada. En la ilustración 51 [15] se muestra la distribución de esta energía en los meses del año.

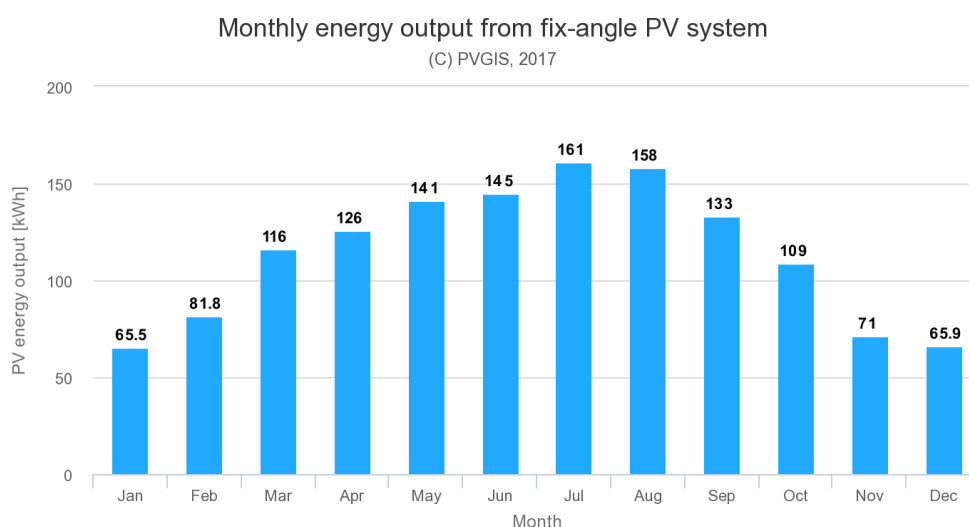


Ilustración 51: Energía generada mensual con 1kWp de fotovoltaica instalada, con ángulo azimutal óptimo y con ángulo de inclinación fijo

Fuente: Photovoltaic geographical information system

No obstante, la instalación de los módulos se realizará integrada en la cubierta del edificio, con una inclinación y un azimut fijos. La orientación del tejado se muestra en la ilustración 52.

- Inclinación: 29°
- Azimut: 45° SE

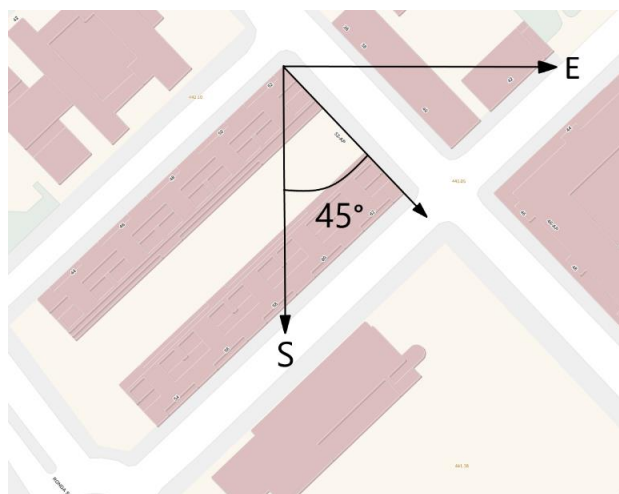


Ilustración 52: Orientación del tejado

En este caso, la energía generada anualmente por una instalación de 1 kWp sería de 1260 kWh, un 8% menor que con la orientación óptima. Es, por lo tanto, una orientación buena para tratarse de una instalación integrada en tejado. De nuevo, se muestran los valores recalculados de energía generada mes a mes en la ilustración 53 [15].

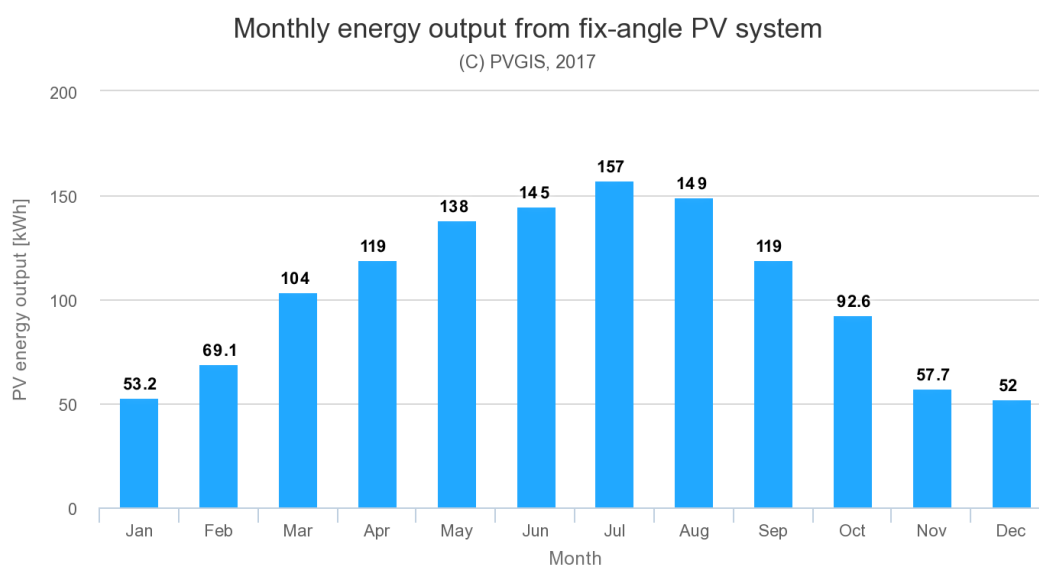


Ilustración 53: Energía generada mensual con 1kWp de fotovoltaica instalada, con el ángulo azimutal y de inclinación del tejado

Fuente: Photovoltaic geographical information system

Pese a obtener una aproximación muy buena con los datos del PVGIS, para el desarrollo de este proyecto se ha decidido utilizar los datos de irradiancia y temperatura obtenidos por la estación climatológica de la Universidad pública de Navarra en el año 2018.

A estos datos se accede a través de la página web del gobierno de navarra, y permite calcular el histórico de radiación solar en periodos de diez minutos para una inclinación y orientación concreta.

2.3.2. Generación fotovoltaica

a) Emplazamiento y dimensiones

Como se ha expuesto en el apartado de localización y climatología, el emplazamiento se encuentra en Zizur Mayor, en la latitud $42^{\circ}47'06.2''\text{N}$ y longitud $1^{\circ}41'30.9''\text{W}$, a 443m sobre el nivel del mar.

La orientación del tejado en el que se van a instalar los paneles es a -45° respecto al S, hacia el SE, tal y como se muestra en la ilustración 54 [14] junto con las trayectorias solares de la localización. La inclinación de este es de 29° y, según los datos del PGIS, esta configuración tendría la capacidad de generar 1260 kWh al año por cada kWp de instalación fotovoltaica.

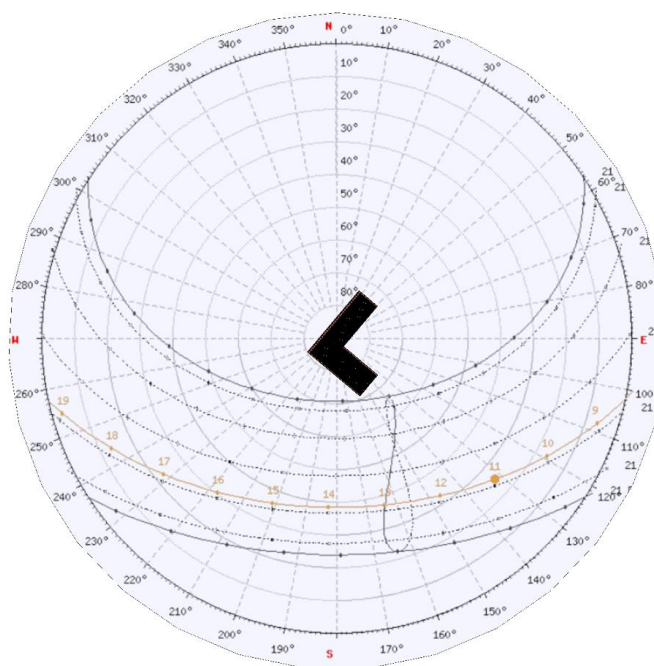


Ilustración 54: Trayectorias solares relativas al tejado
Fuente: SunEarthTools.com

En la ilustración 55 se ve como las 10 viviendas poseen tejados prácticamente idénticos, pero con dos simetrías distintas. Esto, sin embargo, no es determinante a la hora de calcular la capacidad de generación fotovoltaica de los tejados.



Ilustración 55: Disposición de los tejados

El área del tejado se podría descomponer en dos rectángulos formando una “L”. El área total que estos dos conforman es de $21,4 \text{ m}^2$. Dejando un margen en el perímetro del tejado esta área se reduce a $17,5 \text{ m}^2$. Véase la geometría del tejado en la ilustración 56.

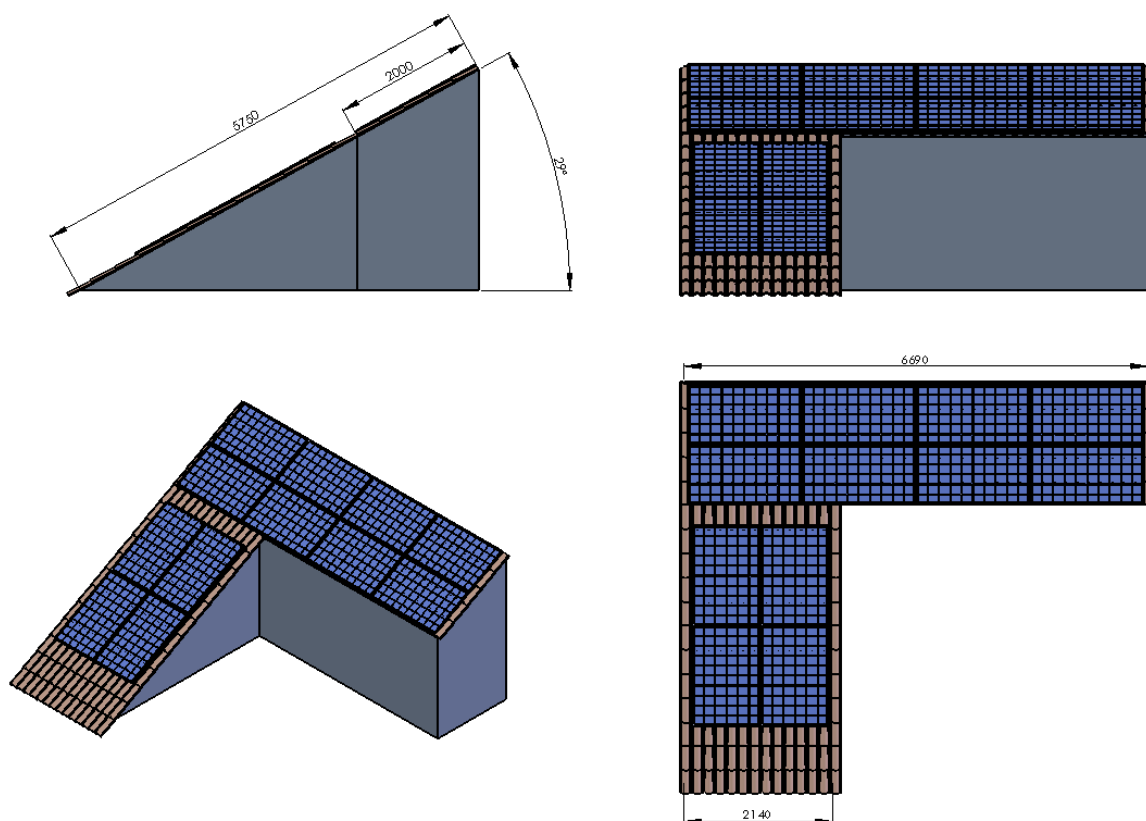


Ilustración 56: Geometría del tejado

Los módulos fotovoltaicos actuales generan aproximadamente 180Wp por cada metro cuadrado. Considerando este dato, cada vecino podría instalar un máximo de 3,15 kWp de energía. Y, basándonos en la aproximación obtenida con la herramienta online del PVGIS, esto se traduciría en 3969 kWh anuales.

Aunque este valor supera el consumo de cualquiera de las viviendas, no es acertado hacer esta comparativa a escala anual. Para comprender mejor la eficiencia de nuestro sistema, es necesario simular la generación fotovoltaica en una escala de tiempo mucho menor, así como contrastarla con el consumo eléctrico de cada instante. De esta forma podremos ver la energía excedente o deficitaria de cada vecino en todo momento del año. Eso nos ayudará a valorar el dimensionamiento de la instalación y, en consecuencia, a optimizar la inversión.

También hay que tener en cuenta que la compensación simplificada es un cómputo mensual y la retribución máxima se reduce a compensar el coste de la energía consumida y de los términos variables. Por ello, toda la energía extra que se vierta a la red a partir de ese punto no es retribuida.

Como los meses de verano van a ser los más rentables, estos periodos van a estar sujetos a estudio de cara a dimensionar la instalación lo justo para no generar energía no retribuida.

b) Módulo fotovoltaico

Para los cálculos de potencia experimentales y para el posterior dimensionamiento técnico existen unos estándares:

Condiciones Estándares de Medida (STC):

Condiciones: Irradiancia de 1000 W/m², distribución espectral de radiación AM 1.5G, incidencia normal y temperatura de la célula de 25°C [16].

Los fabricantes incluyen en las hojas de características, al menos, los siguientes parámetros de la curva I-V del módulo medidos en las condiciones estándares de medida: potencia STC (denominada “POTENCIA PICO (Wp)”), corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto, y corriente y tensión de máxima potencia.

Condiciones Nominales de Operación:

Son las condiciones en las cuales las células alcanzan la Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC o NOCT).

Condiciones: Irradiancia: 800 W/m², distribución espectral de radiación AM 1.5G, incidencia normal, temperatura ambiente 20°C, velocidad del viento de 1 m/s.

A partir de la TONC, de la temperatura ambiente (T_a) y de la irradiancia (G), se puede calcular con una aceptable precisión la temperatura de trabajo de las células fotovoltaicas (T_c) de un módulo o generador a partir de la expresión 6 [16].

$$T_c = \frac{G}{800 \text{ W/m}^2} (TONC - 20^\circ) + T_a \quad (6)$$

A la hora de escoger el módulo fotovoltaico correcto hay que valorar distintos factores como la relación precio-potencia, la relación potencia-área o eficiencia, los años de garantía, la geometría, etc.

Cuando los espacios para la instalación son limitados, es evidente que una relación potencia-área mayor es capaz de sacar mayor partido al área disponible.

Aunque, hasta la fecha, las células de tecnología policristalina eran la opción más evidente para el autoconsumo, la reciente bajada de precios de monocristalina la vuelve a hacer una opción competitiva, véase la ilustración 57 [17]. Además, tienen eficiencias entorno al 20%

en células comerciales y cercanas al 25% en laboratorio, lo que les da una buena relación potencia-superficie. A esto se suma sus mejores coeficientes de temperatura, trabajando mejor a altas temperaturas.

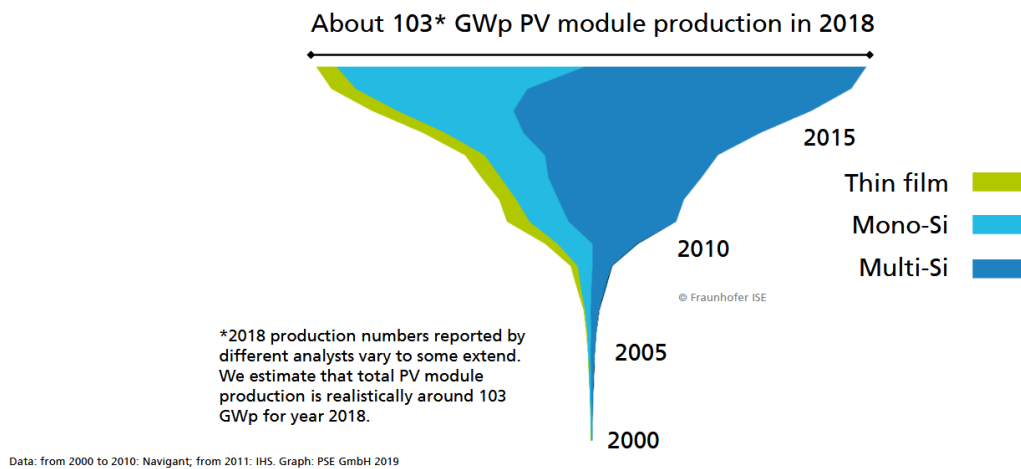


Ilustración 57: Cronología de la potencia de paneles fotovoltaicos fabricados, principales tecnologías

Fuente: Fraunhofer ISE

Por ello, el panel escogido para realizar las simulaciones de este proyecto es el ESPSC Monocrystalline Solar module de la marca ERA Solar. La ilustración 58 muestra las dimensiones del panel [18].

El precio del panel es de 144,39€ [19], su potencia máxima es de 310Wp y el área total es de aproximadamente 1,63 m². A pesar de no tratarse de un panel excesivamente económico, al ser monocristalino, tiene una eficiencia elevada y produce hasta 190W por metro cuadrado.

Estas son las características principales de su ficha técnica [18]:

- Potencia del Panel Solar: 310W
- Dimensiones del Panel Solar: 1650 x 990 x 35 mm
- Tensión Máxima Potencia: 33.5V
- Corriente en Cortocircuito ISC: 9.95A
- Eficiencia del Módulo: 19,00%
- Amperios Máximos de Salida IMP: 9.25A
- Tensión en Circuito Abierto: 39.2V
- Garantía del Panel Solar: 25 años

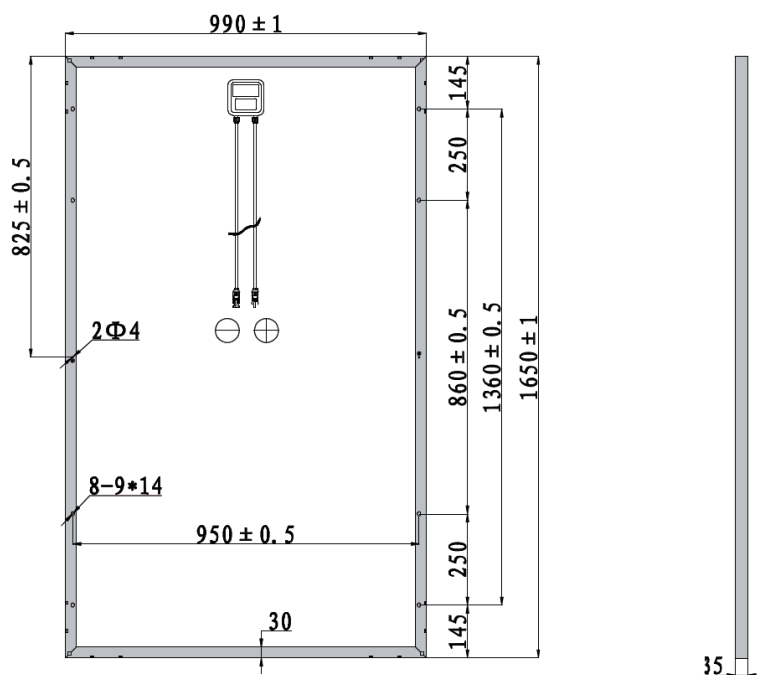
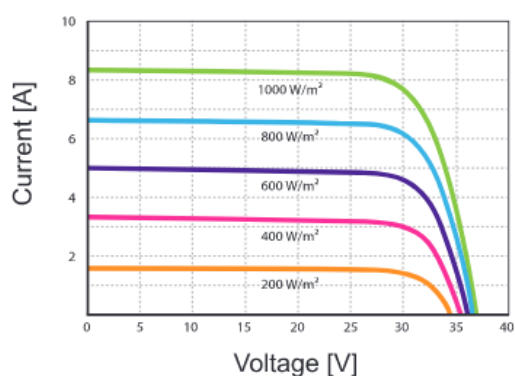


Ilustración 58: Panel ESPSC Monocrystalline de ELA Solar

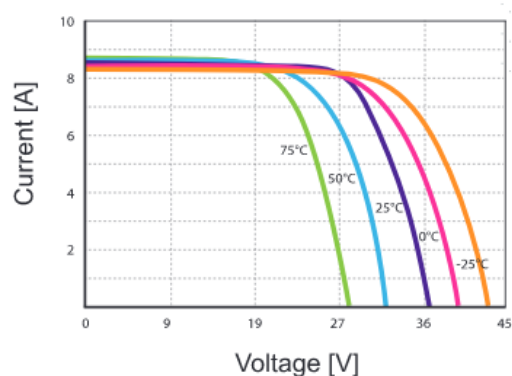
Otras características importantes que describen el comportamiento del panel y que han sido necesarias para el desarrollo de este proyecto son [18]:

- STC: 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1.5
- TONC: 45°C
- Temperature coefficient P_{mpp} : $-0,57402\%/^\circ\text{K}$

Las curvas corriente-tensión en función de la irradiancia y la temperatura se muestran en la ilustración 59 [18].



Module characteristics at constant module temperatures of 25°C and variable levels of irradiance



Module characteristics at variable module temperatures and constant module irradiance of 1.000 W/m^2

Ilustración 59: Características del módulo fotovoltaico

c) Cálculo de potencia generada

Para el cálculo de la potencia fotovoltaica generada es suficiente con conocer los datos de temperatura, de irradiancia y las características del generador fotovoltaico. La fuente escogida registra estos datos en periodos de diez minutos a lo largo de todo el año y gracia a esto podemos calcular la potencia eléctrica generada con una discretización de una sexta parte de hora.

Para calcular el neto de energía en las viviendas, primero es necesario conocer la energía generada por los paneles. Las fórmulas empleadas para el cálculo de esta potencia son las siguientes:

Primero es necesario calcular la temperatura de las células de los paneles en función de la irradiancia G (W/m^2), la temperatura de operación nominal de la célula (TONC) y la temperatura ambiente. La TONC es un parámetro intrínseco de cada modelo de panel y en nuestro caso es de 45°C . Para calcular la temperatura de célula se ha empleado la expresión 7 [16].

$$T_c = \frac{G}{800} (TONC - 20) + T_a \quad (7)$$

Donde T_c es la temperatura de célula y T_a la temperatura ambiente.

Conociendo la temperatura de célula en cada momento, ya es posible hacer un cálculo muy aproximado de la potencia del generador fotovoltaico con la ayuda de la expresión 8 [16]:

$$P = \frac{G}{1000} P_{m\acute{a}x} (1 + \gamma (T_c - 25)) \quad (8)$$

Donde la $P_{m\acute{a}x}$ es la potencia máxima que es capaz de generar el panel y γ es el coeficiente de temperatura de la potencia, un término que indica la caída de potencia en función de la variación de la temperatura.

Utilizando este método de cálculo de potencia fotovoltaica generada, junto con los datos de temperatura e irradiancia diez minutos y las características del panel, se ha calculado la energía generada de un panel y de los distintos casos de estudio.

La ilustración 60 muestra la energía generada a lo largo del año y, como es previsible, se obtiene una curva con sus máximos en verano y mínimos en invierno. Además, no se trata de una curva perfecta, las alteraciones de un día a otro se deben a las diferencias de generación entre días nublados o soleados.

Por otro lado, las ilustraciones 61 y 62 muestran ejemplos modelo de un día de invierno y un día de verano respectivamente. Como es de esperar, el día de verano cuenta con más horas de sol, mayor irradiancia y menos variaciones.

Por último, la ilustración 63 muestra la energía media generada en un día de 2018 hora a hora.

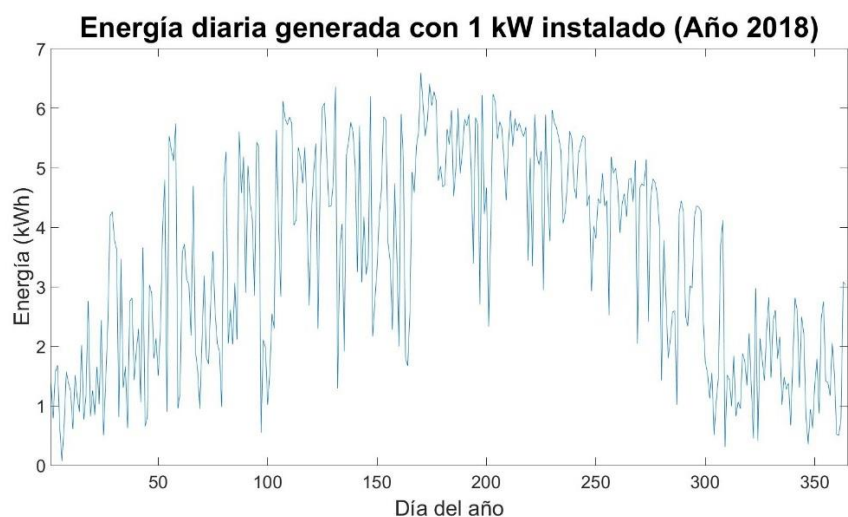


Ilustración 60: Energía diaria generada con 1kWp instalado (2018)



Ilustración 61: Ejemplo de energía generada un día de invierno con 1kWp instalado

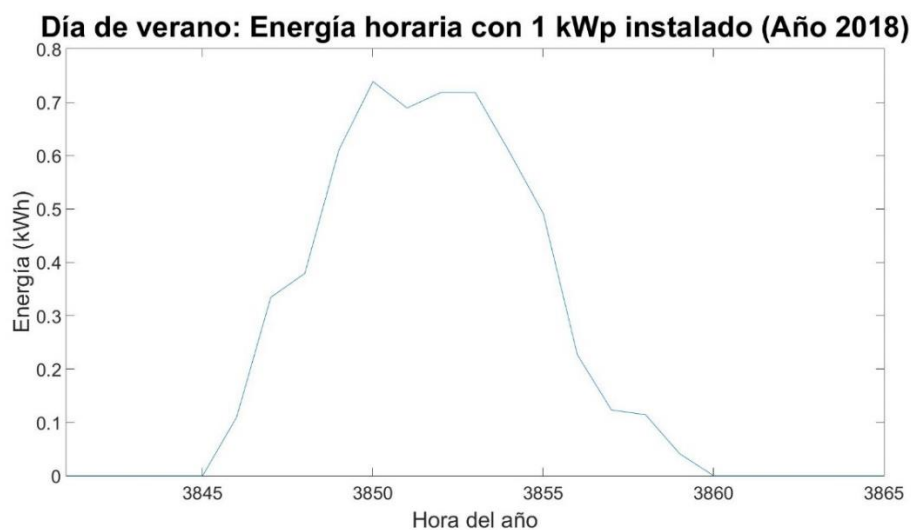


Ilustración 62: Ejemplo de energía generada un día de verano con 1kWp instalado

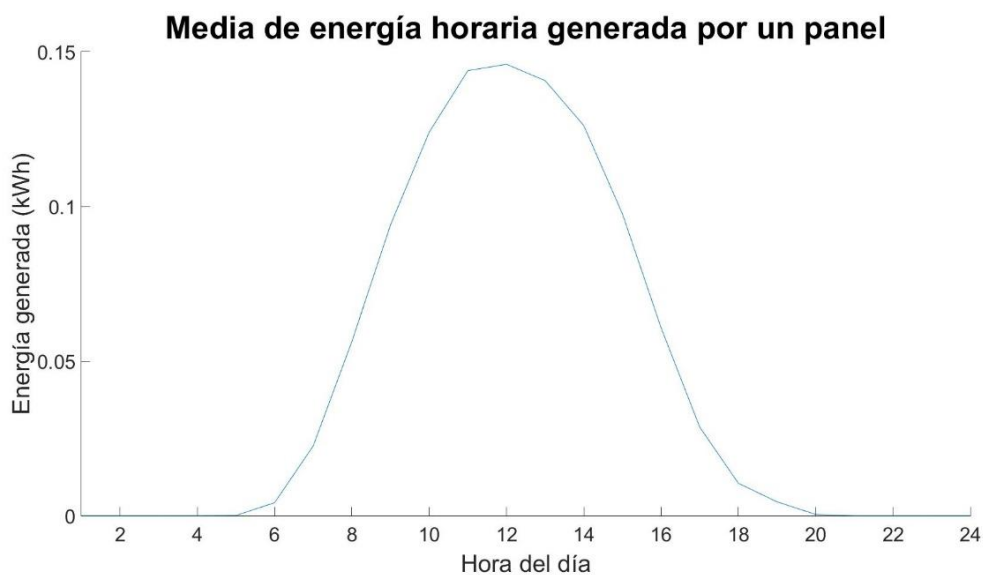


Ilustración 63: Energía horaria media generada en un día por un panel

2.4. Costes de la instalación

En este trabajo no se va a hacer un presupuesto detallado de la inversión con el fin de dar un precio real de una instalación concreta. El objetivo de este apartado es mostrar con datos como se ha cuantificado la inversión de los aspectos más relevantes que van a vislumbrar la viabilidad de cada estrategia.

2.4.1. Precio del inversor

Una parte fundamental del presupuesto de una instalación fotovoltaica es el precio del inversor. Existen inversores monofásicos y trifásicos. Los primeros se utilizan fundamentalmente en viviendas y los segundos en instalaciones industriales y en plantas de generación. No obstante, una comunidad de vecinos podría considerar invertir en un inversor trifásico si esto resulta rentable.

El precio del inversor depende de su potencia, del fabricante y de funcionalidades adicionales que puedan incorporar. Para realizar una aproximación realista del precio de los inversores se ha recopilado una lista de inversores y clasificado según su potencia, precio y tipo. Esta información se ha contrastado en la web de venta de paneles e inversores Autosolar [20].

a) Monofásicos:

Por un lado, se han clasificado los inversores monofásicos y se ha creado la base de datos mostrada en la tabla 4 [20].

SMA		FRONIUS Primo		FRONIUS Primo light	
Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)
1500	717	3000	1221	3000	1119
2000	867	3500	1318	3500	1182
2500	964	3600	1328	3600	1194
3000	1089	4000	1354	4000	1255
3600	1161	4600	1477	4600	1324
5000	1308	5000	1489	5000	1395
6000	1450	6000	1761	6000	1672
		8200	2029	8200	1949
INGETEAM		FRONIUS Galvo		FRONIUS Galvo light	
Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)
5000	1038	1500	1206	1500	1083
6000	1349	2500	1266	2000	1113
		3100	1297	3100	1173
SOLAX mini		SOLAR EDGE HD		RIELLO Sirio EVO	
Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)
700	373	2200	907	1500	958
1100	386	3000	1033	2000	1050
1500	477	3500	1187	3000	1142
2000	538	4000	1274	4000	1168
SOLAX Air		5000	1342	5000	1331
Potencia (VA)	Precio (€)	6000	1603	6000	1423
2500	560	8000	2038	RIELLO Sirio RS	
3000	605	10000	2223	Potencia (VA)	Precio (€)
3300	667	SOLAR EDGE		1500	1038
SOLAX Boost		Potencia (VA)	Precio (€)	2000	1097
3000	691	1000	895	3000	1200
3300	783	1500	952	5000	1471
3680	831	2000	1047	6000	1586
4200	903	3500	1187		
4600	939	4000	1274		

Tabla 4: Precios de diversos inversores monofásicos

En la ilustración 64 se han representado los precios de las distintas marcas sobre una misma gráfica para poder realizar una comparación fácil de los precios. Como se ve en la ilustración, los inversores Solax son los más económicos y la aproximación lineal de los precios de esta marca es la que se va a utilizar a la hora de simular el coste de los inversores en instalaciones individuales.

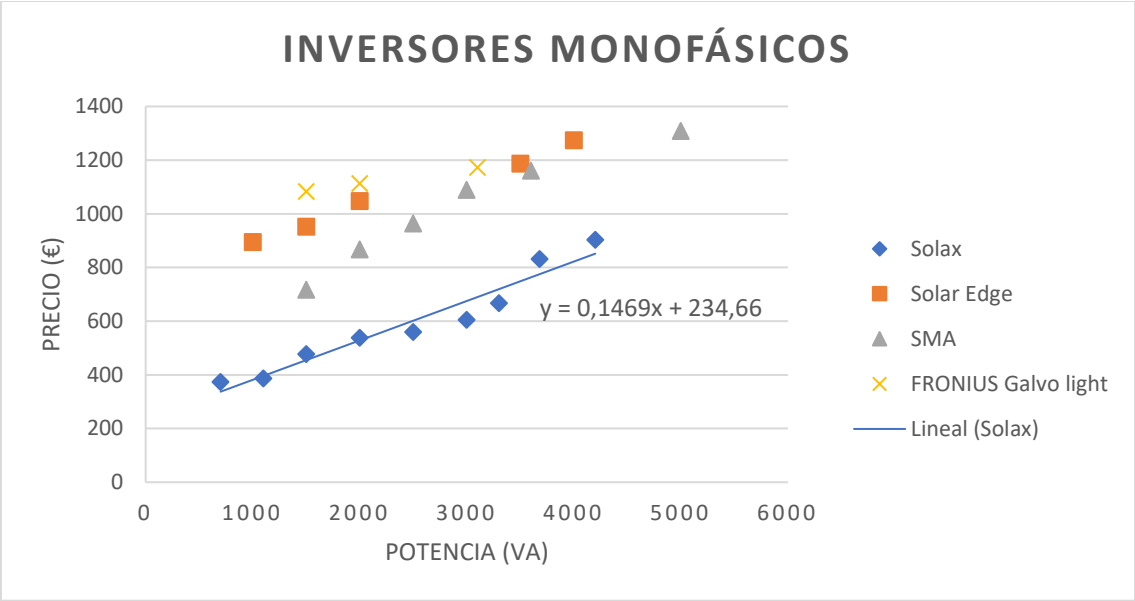


Ilustración 64: Distribución y tendencia de costes por potencia de inversores monofásicos

$$\text{Precio Inversor monofásico (€)} = 0.1469 P_{inv}(\text{€/W}) + 234.66 \text{ €} \quad (9)$$

Donde P_{inv} es la potencia del inversor.

b) Trifásico:

De la misma forma que con los inversores monofásicos, también se han contrastado los precios de los inversores trifásicos y se han representado en la ilustración 65 para poder compararlos. Los costes utilizados se muestran en las tablas 5 y 6 [20].

HUAWEI		SOLAR EDGE		INGETEAM	
Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)
3000	1300	3000	1300	20000	2378
4000	1360	4000	1473	33000	3317
5000	1436	5000	1577	100000	9145
6000	1600	6000	1707	INGETEAM M	
8000	1894	7000	1779	Potencia (VA)	Precio (€)
10000	2125	8000	1977	20000	3491
12000	2242	9000	2054	33000	4189
15000	2527	10000	2134		
17000	2580				
20000	2722				
33000	3136				
36000	3665				
60000	5121				
185000	10940				

Tabla 5: Precios de diversos inversores trifásicos, 1

FRONIUS Symo M		FRONIUS Symo M light		FRONIUS Symo S light	
Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)	Potencia (VA)	Precio (€)
3000	1429	3000	1305	3000	1308
3700	1589	3700	1444	3700	1440
4500	1655	4500	1531	4500	1574
5000	1682	5000	1558		
6000	1717	6000	1594		
7000	2131	7000	2007		
8200	2357	8200	2233		
10000	2486	10000	2357		
12500	2820	12500	2690		
15000	2840	15000	2720		
17500	3031	17500	2912		
20000	3166	20000	3047		
25000	3268	25000	3147		
27000	3358	27000	3236		

Tabla 6: Precios de diversos inversores trifásicos, 2

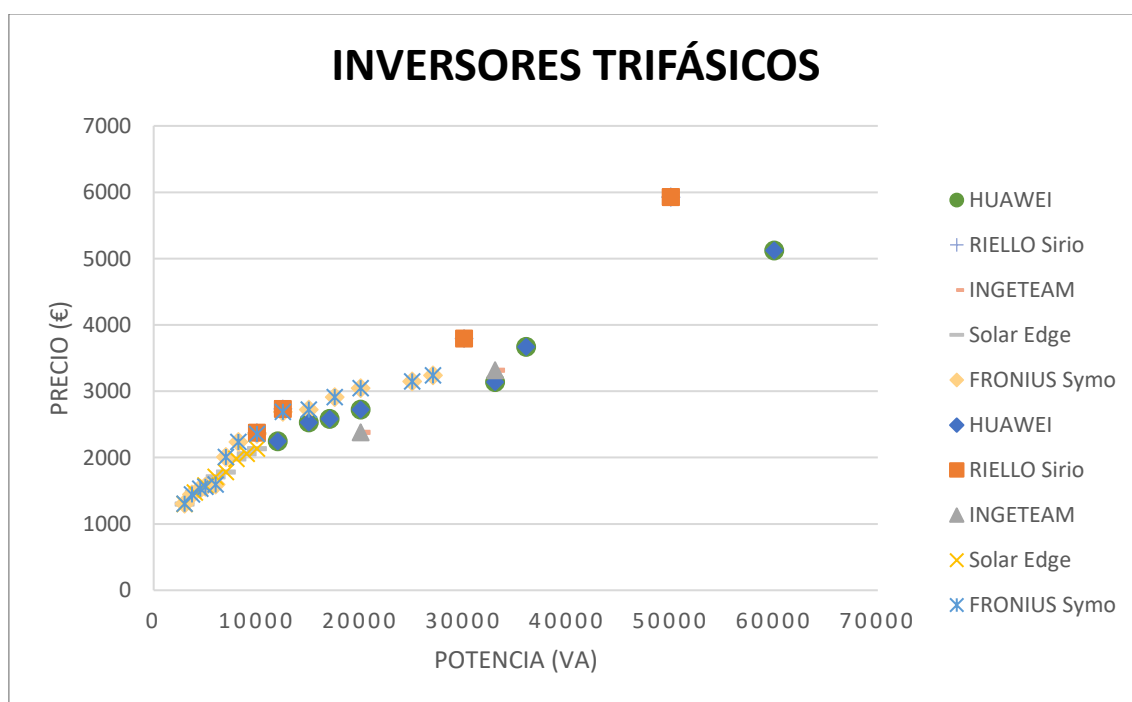


Ilustración 65: Distribución de costes por potencia de inversores trifásicos

Como se ha podido observar, Huawei es uno de los fabricantes más económicos y a su vez contamos con muchos modelos y un gran rango de potencia, por lo que nos permite aproximar una función con más datos. Por ello, los datos utilizados para la aproximación del precio de los inversores trifásicos son los de Huawei. En la ilustración 66 se aíslan los datos de Huawei y se extrae la curva de precio de inversores trifásicos.

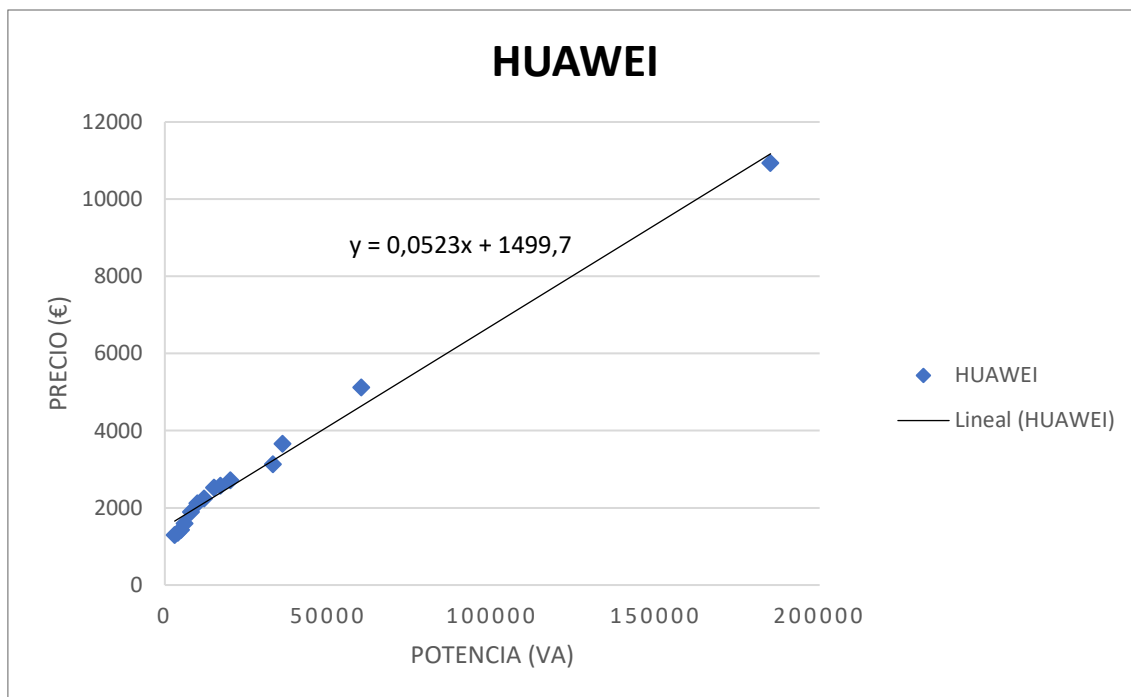


Ilustración 66: Distribución y tendencia de costes por potencia de los inversores monofásicos de Huawei

$$\text{Precio Inversor trifásico (€)} = 0.0523 P_{inv}(\text{€}/W) + 1499.7 \text{ €} \quad (10)$$

2.4.2. Precio de los paneles

Como se ha mostrado en el apartado 2.2.2. b), sobre el panel fotovoltaico, el panel escogido para realizar las simulaciones de este proyecto es el ESPSC Monocrystalline Solar module de la marca ERA Solar y de la unidad es de 144,39€.

Por ello, el precio de este apartado del presupuesto es lineal y proporcional a la cantidad de paneles que instale cada vecino.

2.4.3. Mano de obra

El coste de la mano de obra en un proyecto es muy variable y depende fundamentalmente de la cantidad de trabajadores y su nivel de cualificación. No obstante, las empresas instaladoras de paneles fotovoltaicos dan un precio en función a la cantidad de paneles a instalar y la localización de estos.

Como estimar estos costes fuera de un proyecto real está sujeto a mucha incertidumbre, en el caso de este estudio se ha empleado una aproximación lineal empleada en pasados trabajos de la UPNA y facilitada por el director de este proyecto. La ilustración 67 [21] muestra la función de costes de mano de obra.

El coste de instalación engloba el coste de mano de obra y otros costes relacionados con las operaciones de traslado de materiales y recursos humanos, así como de márgenes de beneficio y cobertura de gastos de la empresa.

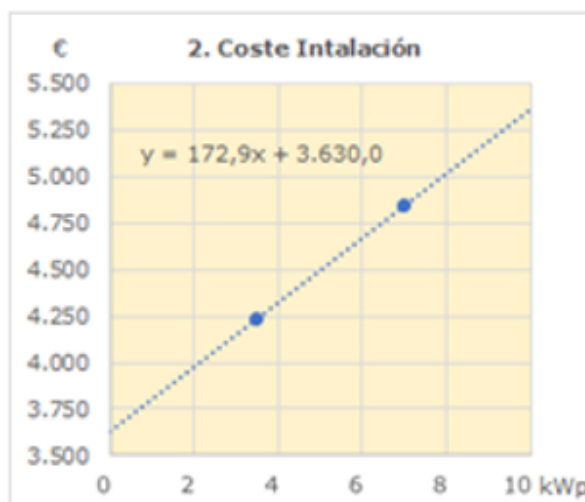


Ilustración 67: Función de coste de la mano de obra

$$C_{inst}(\text{€}) = 3630 \text{ €} + 172,9 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWp}} \right) \cdot P_{pi} (\text{kWp}) \quad (11)$$

Donde C_{inst} es el coste de la instalación, P_{pi} es la potencia pico instalada.

La aproximación es una función lineal con ordenada, lo que significa que la inversión es proporcional a la potencia instalada y además cuenta con un coste fijo. Por ello, es evidente que, cuanto mayor sea la inversión, menos se percibe la influencia del coste fijo, lo que convierte a las inversiones conjuntas en una opción más económica.

3. ESCENARIOS DE AUTOCONSUMO

Conociendo el consumo y la generación eléctrica, ya es posible calcular el neto de energía de cada vecino para todo momento.

El estudio de los distintos escenarios se basa, en parte, en cómo se gestiona esta energía neta.

$$E_N = E_G - E_C \quad (12)$$

Donde E_N es la energía neta y E_G y E_C son las energías generadas y consumidas respectivamente.

Se considerará la energía neta como la energía generada menos la consumida en un periodo de tiempo. Por ello, si esta es positiva, la generación es mayor que el consumo y, por el contrario, si es negativa, el vecino consume más energía de la que genera.

La energía sobrante puede verterse directamente a la red con la intención de acogerse a la compensación simplificada o también podría emplearse en compensar el déficit de energía de un vecino. Si este intercambio se realiza a un precio conveniente para ambos vecinos, es un beneficio económico para todos.

3.1. Autoconsumo individual

En el primer escenario, supondremos que los vecinos deciden invertir en una instalación de autoconsumo de forma individual. Cada uno contrata los servicios de una empresa por separado y reciben presupuestos distintos. A su vez, al tratarse de autoconsumo individual, cada vivienda dispondría de su inversor monofásico propio y su contador.

Este escenario es el más habitual hoy en día en los sistemas de autoconsumo no aislados. Cada vecino cuenta con su propia instalación de generación y hace uso de esa energía para reducir su dependencia de la red. A su vez, la energía que el usuario no emplee puede ser vertida a la red y, acogiéndose a la compensación simplificada, recibir una pequeña remuneración por esta energía. Otra ventaja posible de instalar un sistema fotovoltaico es que, dependiendo de los hábitos de consumo eléctrico de cada vecino, la generación eléctrica propia podría reducir los picos de potencia demandada a la red y disminuir, a su vez, la potencia contratada. Esto supondría un ahorro en el término fijo de la factura.

Esta inversión supondrá un ahorro gracias a la reducción de energía consumida de la red, la rebaja de la potencia contratada y en última instancia, gracias a la compensación simplificada.

Por otro lado, al igual que en la mayoría de las industrias, si más de un vecino planea instalar generadores fotovoltaicos en sus hogares, realizar una inversión conjunta podría abaratar costes ya que la compra e instalación es más económica cuanto mayor es la inversión. A esto se le suele denominar autoconsumo colectivo.

3.2. Autoconsumo colectivo

Esto nos sitúa en el segundo escenario, en el que, de la misma forma que en el primero, cada vecino tiene un contrato separado y decide realizar autoconsumo individual, pero efectúan

una inversión conjunta que les permite ahorrar al comprar a mayor escala y reducir costes fijos como la mano de obra.

En este caso, cada vecino decide cuantas placas instalar para su autoconsumo, pero se cuenta con una instalación única. Es decir, un único inversor reparte la energía entre los vecinos de forma proporcional a su inversión en la instalación.

En definitiva, el ahorro de este caso respecto al anterior reside en el precio del inversor y en que los gastos fijos de la mano de obra se asumen en conjunto.

3.3. Autoconsumo agrupado con óptimo colectivo

En el tercer escenario, los vecinos se unen como un solo cliente para formar una mutua de consumidores, siendo necesaria la intervención de una gestora. Esta necesidad se debe a la complejidad de las retribuciones internas, por lo que la gestora es responsable de gestionar los pagos a la comercializadora y las transacciones entre vecinos.

En este caso, se va a buscar la potencia de instalación óptima del conjunto, la inversión se pagará de forma equitativa entre los vecinos y contará con un inversor trifásico único para toda la comunidad. De la misma forma que la inversión es equitativa, el reparto de la energía también lo es, al menos desde un punto de vista económico.

Como se ha explicado con anterioridad, la energía neta de cada vecino es la energía generada que le corresponde menos la energía que consume. La energía neta de la comunidad es el sumatorio de la energía neta de cada vecino:

$$E_{Ncomunidad} = \sum_{n \text{ vecinos}} E_N \quad (13)$$

Donde $E_{Ncomunidad}$ es el neto de energía de la comunidad.

En base a este neto se generan las facturas que la comunidad tiene que pagar a la comercializadora.

Independientemente del neto de la comunidad, en todo momento puede haber vecinos con exceso de energía generada o vecinos que consuman más de lo que generen. Es aquí donde entra en juego el intercambio de energía interno. Los vecinos “excedentarios” pueden vender su energía a los vecinos “deficitarios” a un precio previamente pactado y conveniente para todos.

Supongamos que el precio de la energía para un periodo concreto es de 0,14€/kWh y que el valor por el que la comercializadora retribuye la energía vertida a la red es de 0,05€/kWh. Si el intercambio de energía entre los vecinos se tasa en un término medio de estas dos tarifas, el precio de esta energía sería de 0,095€/kWh, por lo que el vecino con energía en exceso obtendrá más beneficio de esta transacción de lo que hubiese conseguido con la comercializadora. A su vez, el vecino con energía en defecto habrá logrado ahorrar en la energía que obtiene de terceros.

Para poder acogerse a este sistema, es imprescindible que todos los participantes sean una sola entidad consumidora y, por lo tanto, compartan una red eléctrica interna con contador único y con la misma tarifa para todos. Este elemento daría el parte del consumo neto a la comercializadora.

Por otro lado, mediante el uso de contadores individualizados, se registran las transacciones internas de energía y el periodo en el que estas se efectúan. Es importante realizar este último registro para poder identificar el régimen tarifario de este periodo y poder calcular el precio de esas transacciones.

Al implementar este sistema es necesario considerar que el conjunto de módulos fotovoltaicos son un solo generador eléctrico propiedad de la comunidad. Desde un punto de vista económico, la energía que este genere se reparte inicialmente a partes iguales y cualquier desequilibrio en el reparto de energía real equivale a transacciones entre vecinos. Los vecinos que registran en su contador un consumo menor a su parte proporcional de la energía generada deberán ser compensados y los vecinos con un consumo superior contraen una deuda con la comunidad.

La cuota energética que cada vecino tendrá que pagar mensualmente a la comunidad se compondrá por un lado de su parte proporcional de la factura de la comunidad y por otro de su aportación o deuda a la comunidad.

$$Cuota_{vecino} = \frac{TF}{N_{vecinos}} + \int E_{c \text{ red vecino}} \cdot p_E(\text{periodo}) - \int E_{v \text{ red vecino}} \cdot p_{compensación} + \int E_{vecinos} \cdot p_{vecinos}(\text{periodo}) \quad (14)$$

$Cuota_{vecino} \equiv$ Pago mensual de cada vecino

$TF \equiv$ Coste del término fijo total de la comunidad

$N_{vecinos} \equiv$ Número de vecinos

$E_{c \text{ red vecino}} \equiv$ Energía consumida de la red por el vecino

$E_{v \text{ red vecino}} \equiv$ Energía vendida a la red por el vecino

$p_E \equiv$ Precio de la energía de la red en un determinado periodo

$p_{compensación} \equiv$ Precio de la energía retribuida

$p_{vecinos} \equiv$ Precio de la energía establecida por los vecinos para su intercambio

Como los precios de las tarifas son valores discretos de periodos horarios, no es necesario ningún cálculo integral, basta con realizar un registro con bolsas de deuda contraída o emitida.

Otra ventaja de este sistema reside en el cupo de la compensación simplificada. De forma individual, los vecinos son capaces de llegar a el cupo y conseguir que el término variable de la factura se reduzca únicamente al peaje de esta. Pero toda la energía extra que viertan a partir de cumplir el cupo no es retribuida. Al formar una comunidad de consumidores, el cupo es mucho mayor y la probabilidad de completarlo es mucho menor. Cada vecino es compensado como si hubiese llegado a su cupo, pero la comunidad acumula un pequeño beneficio del resto de energía vertida.

Un problema de este sistema es que en los periodos en los que la comunidad esté en netos negativos y necesite consumir energía de la red, es posible que el neto total de la comunidad no coincida con el neto reclamado por la comercializadora. Esto se debe a que no se están considerando las pérdidas de la red interna y a que puede haber discrepancias en los aparatos de medida.

$$E_{Ncomunidad} = -E_G + \sum_{n \text{ vecinos}} E_{Cn} \neq E_{cred} \quad (15)$$

Donde, E_{Cn} (kWh) es el consumo de energía de cada vecino registrado por su contador particular, y E_{cred} (kWh) es la energía consumida registrada por el contador general de la comunidad.

Para compensar este fenómeno es necesario hacer un ajuste proporcional de los consumos de la red. Cada vecino deberá aportar la parte proporcional de su consumo respecto al consumo total de la comunidad.

En definitiva, el pago mensual de cada vecino es:

$$Cuota_{vecino} = TF_i + TV_i^* + Trans \quad (16)$$

Donde TF_i (€) es la parte proporcional del término fijo que corresponde a cada vecino, TV_i^* (€) es el término variable ajustado de cada vecino y $Trans$ (€) es el neto de deudas o activos resultantes de las transacciones de energía entre viviendas para cada vecino concreto.

Término fijo individual:

$$TF_i = \frac{TF}{N \text{ vecinos}} = \frac{(Peaje P contratada + MC) \cdot P_{cont}}{12 \cdot N \text{ vecinos}} \quad (17)$$

Donde TF (€) es el término fijo total de la comunidad, MC (€/kW) es el margen de la comercializadora, $N \text{ vecinos}$ es el número de vecinos en la comunidad, $Peaje P contratada$ (€/kW) es el coste de la potencia contratada y P_{cont} (kW) la potencia contratada de la comunidad.

Término variable individual:

$$TV_i = \int E_{cred \text{ vecino}} \cdot p_E(\text{periodo}) - \int E_{v \text{ red vecino}} \cdot p_{compensación}; \forall TV_i \geq 0 \quad (18)$$

Término variable individual ajustado:

$$TV_i^* = TV_i + Ajuste_{veino}; \forall TV_i \geq 0 \quad (19)$$

$$Ajuste_{veino} = (E_{cred} - E_{Ncomunidad}) \cdot \frac{TV_i}{TV_T} \quad (20)$$

3.4. Autoconsumo agrupado con óptimo individual

El cuarto escenario es parecido al tercero solo que en este caso se respeta la potencia de generación óptima adaptada al consumo de cada vecino y no al consumo neto de la comunidad.

Por ello, se diferencian en la forma en la que los vecinos participan en la inversión y el modo en el que se reparte la energía. En este caso, cada vecino decide cuantos paneles le conviene instalar, pero todos penden del mismo inversor y la comunidad puede seguir intercambiando la energía de forma interna.

4. RESULTADOS

4.1. Autoconsumo individual

Cada vecino tiene sus hábitos de consumo eléctricos y, por lo tanto, no todos necesitan instalar la misma cantidad de paneles. Cuanto mayor es el consumo diurno de estos, mayor ventaja tendrá instalar una potencia fotovoltaica mayor. Dicho de otra forma, a medida que aumenta la potencia fotovoltaica instalada, menor es la factura eléctrica pero el coste de la inversión es mayor. Al simular el coste de las facturas eléctricas en función de la potencia fotovoltaica instalada y sumarle la inversión realizada en cada caso, se obtiene una función curva como la mostrada en la ilustración 68. El mínimo coincide con la potencia instalada óptima, ya que es la potencia con la que se consigue el mínimo pago mensual.

Factura y amortización anual en función de paneles instalados. Perfil 5

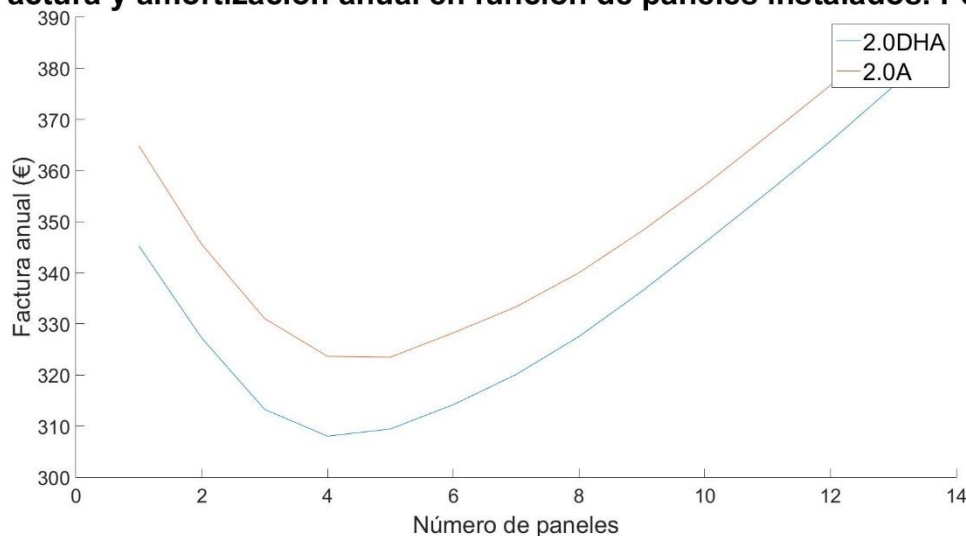


Ilustración 68: Curva de costes totales de la factura y amortización de la inversión en función a la cantidad de paneles instalados

En el caso de la simulación realizada en este trabajo, la inversión se ha reflejado mediante unas cuotas de amortización sumadas a las facturas mensuales de la electricidad.

El fabricante de paneles garantiza un rendimiento del 80% durante 20 años. Por ello, se ha fijado el horizonte de inversión en 20 años.

En la tabla que se muestra a continuación aparece el número de paneles óptimo para cada vivienda, así como la factura eléctrica resultante tras implementar la instalación fotovoltaica.

Como se ha podido comprobar en el apartado 2.2 sobre la influencia de las tarifas eléctricas, la tarifa con discriminación horaria es rentable en prácticamente todos los casos, por ello, para la simulación del autoconsumo individual también se ha escogido esta tarifa.

Factura anual Tarifa 2.0DHA					
Vecino	Nº paneles óptimo	Potencia instalada (kW)	Factura	Inversión anualizada	Total
Perfil 1	8	2,5	321,90	290,64 €	612,55 €
Perfil 2	15	4,7	1714,14	375,88 €	2.090,01 €
Perfil 3	10	3,1	285,37	315,00 €	600,37 €
Perfil 4	8	2,5	223,31	290,64 €	513,95 €
Perfil 5	4	1,2	176,03	241,94 €	417,97 €
Perfil 6	9	2,8	297,83	302,82 €	600,66 €
Perfil 7	13	4,0	515,72	351,53 €	867,24 €
Perfil 8	15	4,7	421,08	375,88 €	796,96 €
Perfil 9	7	2,2	196,01	278,47 €	474,47 €
Perfil 10	11	3,4	334,30	327,17 €	661,48 €
TOTAL	100	31	4.485,69 €	3.149,97 €	7.635,66 €

Tabla 7: Resultados del autoconsumo individual

En la tabla 8 se comparan estos resultados con los de las facturas sin fotovoltaica. En ella vemos que, con los costes de inversión y parámetros establecidos, el autoconsumo es rentable para solamente cuatro de los diez vecinos. Concretamente para los vecinos con mayores consumos eléctricos.

Factura anual con inversión individual					Comparación
Sin PV 2DHA		Con FV Óptima DHA			
Vecino	Factura	Factura	Inversión Anual	Total	
Perfil 1	559,73 €	321,90 €	290,64 €	612,55 €	52,82 €
Perfil 2	2.144,80 €	1.714,14 €	375,88 €	2.090,01 €	-54,79 €
Perfil 3	575,02 €	285,37 €	315,00 €	600,37 €	25,35 €
Perfil 4	488,09 €	223,31 €	290,64 €	513,95 €	25,86 €
Perfil 5	292,97 €	176,03 €	241,94 €	417,97 €	125,00 €
Perfil 6	580,17 €	297,83 €	302,82 €	600,66 €	20,49 €
Perfil 7	868,66 €	515,72 €	351,53 €	867,24 €	-1,41 €
Perfil 8	890,30 €	421,08 €	375,88 €	796,96 €	-93,35 €
Perfil 9	436,96 €	196,01 €	278,47 €	474,47 €	37,52 €
Perfil 10	695,48 €	334,30 €	327,17 €	661,48 €	-34,01 €

Tabla 8: Comparación de los resultados del autoconsumo individual con las facturas sin inversión fotovoltaica

Esto se debe a que la cantidad ahorrada en la factura es inferior a la amortización de la inversión. Estos vecinos no consumen suficiente energía eléctrica como para que les resulte rentable instalar un generador fotovoltaico.

En la ilustración 69 se muestra el peso de los distintos conceptos en el coste total de la energía para el caso del autoconsumo individual.

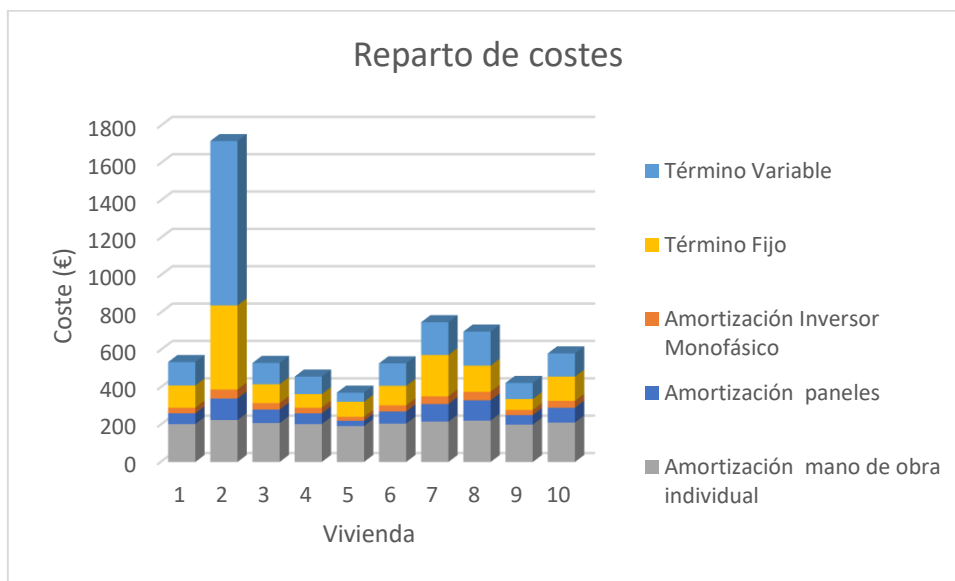


Ilustración 69: Distribución de los costes por conceptos, autoconsumo individual

No hay que olvidar que este trabajo es un análisis comparativo de distintos casos y los costes empleados pueden variar en la realidad de un año para otro. No se pretende dar conclusiones absolutas sobre la rentabilidad del autoconsumo, si no descubrir las ventajas de distintas modalidades.

Pese a que este resultado pueda parecer pesimista, cada vez más gente decide instalar fotovoltaica en sus tejados porque en la mayoría de los casos esta opción es económicamente rentable, contribuye a la descentralización de la generación eléctrica y reduce nuestra huella de carbono.

Sin embargo, este trabajo pretende explorar más posibilidades y averiguar si hay formas de sacar más partido a la energía generada.

4.2. Autoconsumo colectivo

Hasta ahora se ha analizado el caso del autoconsumo individual con una inversión independiente de cada uno de los vecinos. En casi todas las industrias, la compra al por mayor suele resultar más económica y la fotovoltaica no es una excepción.

Como se ha explicado en el apartado de presupuesto, el precio de la mano de obra consta de una parte proporcional a la potencia instalada más un coste fijo. En el caso de realizar una inversión conjunta, el coste fijo se repartiría entre los inversores, abaratando el desembolso sobre todo las inversiones de menor potencia, tal y como se muestra en la ilustración 70.

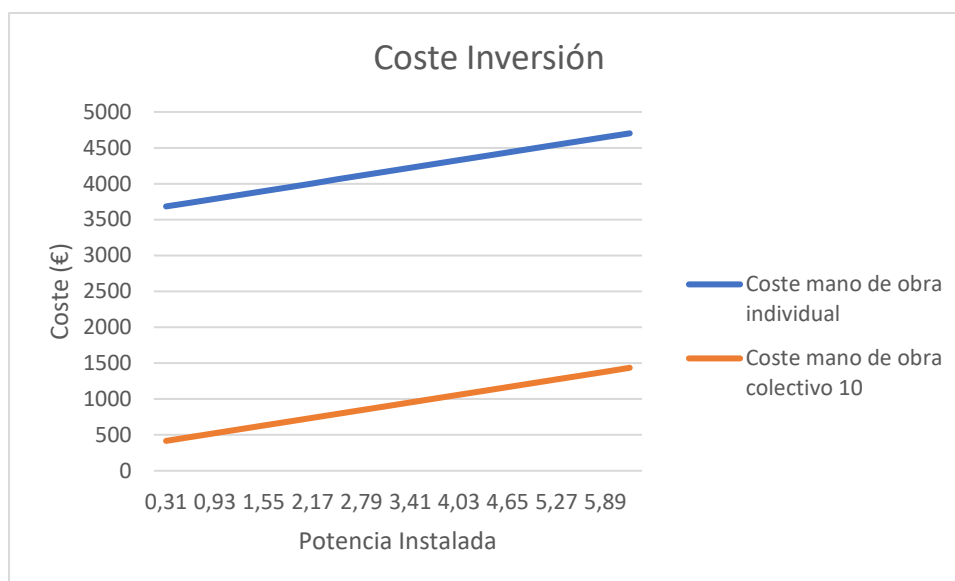


Ilustración 70: Comparación de costes de mano de obra

Otro beneficio del autoconsumo colectivo es el ahorro en los inversores de potencia. En un autoconsumo agrupado, en lugar de comprar 10 inversores monofásicos separados, existe la posibilidad de adquirir un solo inversor trifásico que, repasando lo analizado en el apartado de costes, resulta más económico a partir de cierta potencia. Como se puede comprobar en la ilustración 71, a partir de 13 kW los inversores trifásicos resultan más rentables, por lo que la comunidad también se ve beneficiada de esto.

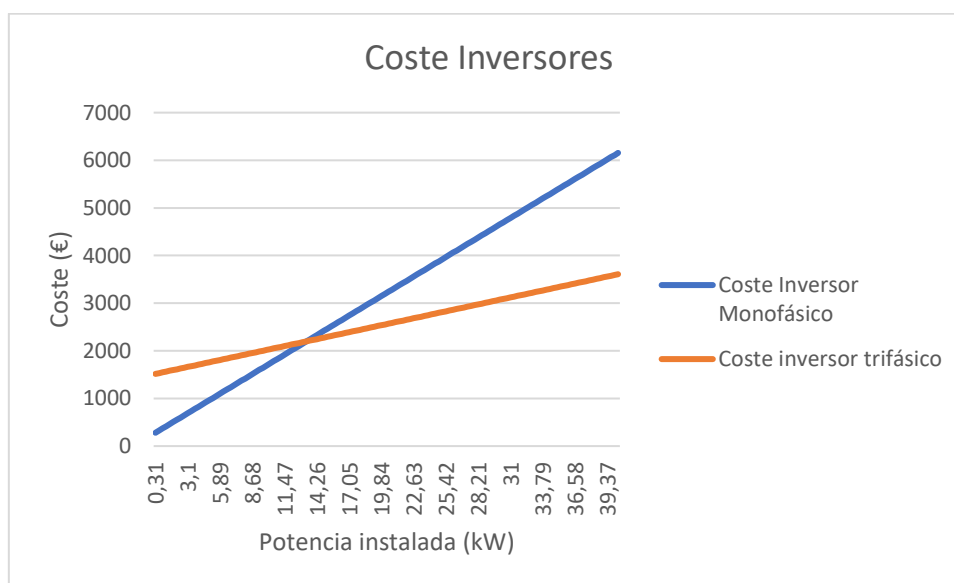


Ilustración 71: Comparación de curva de costes de inversores monofásicos y trifásicos

De esta forma los resultados son los mostrados en la tabla 9.

Factura anual con inversión colectiva					Comparación
Sin PV 2DHA		Con FV Óptima DHA			
Vecino	Factura	Factura	Inversión Anual	Total	
Perfil 1	559,73 €	321,90 €	108,53 €	430,44 €	-129,29 €
Perfil 2	2.144,80 €	1.701,98 €	184,51 €	1.822,67 €	-322,13 €
Perfil 3	575,02 €	285,37 €	127,53 €	393,90 €	-181,11 €
Perfil 4	488,09 €	223,31 €	108,53 €	331,85 €	-156,25 €
Perfil 5	292,97 €	176,03 €	70,55 €	284,57 €	-8,40 €
Perfil 6	580,17 €	297,83 €	118,03 €	406,37 €	-173,80 €
Perfil 7	868,66 €	515,72 €	156,02 €	624,25 €	-244,41 €
Perfil 8	890,30 €	421,08 €	175,01 €	529,61 €	-360,69 €
Perfil 9	436,96 €	196,01 €	99,04 €	304,54 €	-132,42 €
Perfil 10	695,48 €	334,30 €	137,02 €	442,84 €	-252,65 €

Tabla 9: Resultados del autoconsumo colectivo

Gracias a la inversión conjunta se ha logrado superar la barrera de la inversión y, con estas condiciones, el autoconsumo resulta ser beneficioso para todos los vecinos. En la gráfica de columnas representada a continuación se ve reflejado como ha disminuido el coste de la mano de obra al realizar la inversión conjuntamente. Una vez más, en la ilustración 72 se muestra la distribución de costes en este caso.

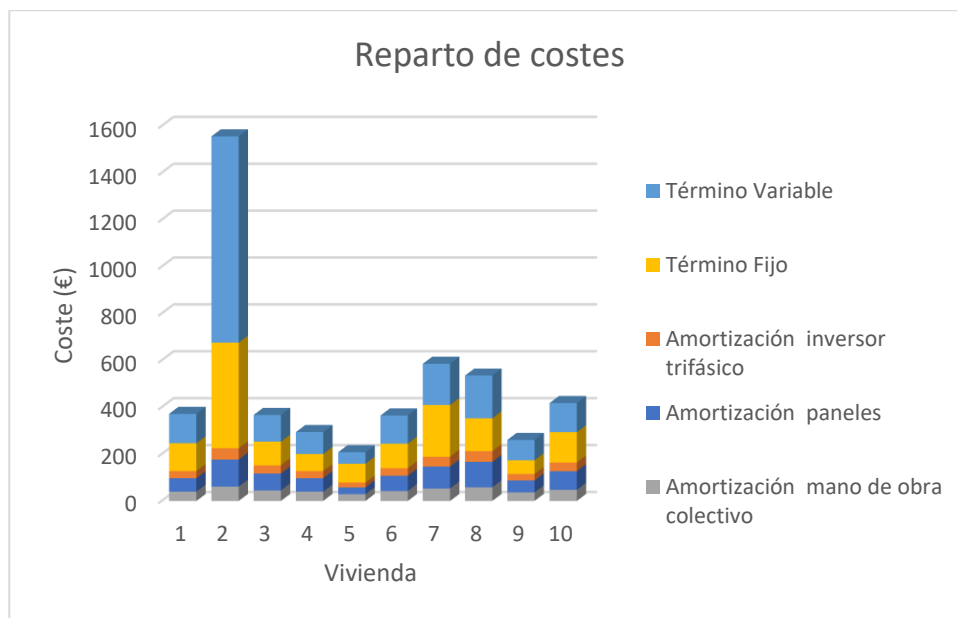


Ilustración 72: Distribución de costes por concepto, autoconsumo colectivo

4.3. Autoconsumo agrupado con óptimo colectivo

En el apartado 3.3 sobre la gestión de la energía neta se explicaba como un conjunto de vecinos se puede agrupar con el objetivo de sacar mayor partido a la energía eléctrica sobrante.

Con esta misma estrategia surgen distintos casos de estudio en función de cómo se realiza la inversión del generador fotovoltaico.

En el primer caso se ha simulado una inversión homogénea. Es decir, todos pagan la parte proporcional de dividir la inversión entre el número de vecinos. En esta modalidad, se busca el número de paneles óptimo del conjunto y no de cada individuo. Esta opción es la más rentable en términos comunitarios, pero no es justa de forma individual ya que esta inversión es beneficiosa para algunos y perjudica al resto.

Pese a no ser una opción válida para los casos de estudio de este trabajo, en el caso de que todos los vecinos fueran grandes consumidores de energía eléctrica, este sistema seguiría sin ser del todo justo, pero al menos sería beneficioso para todos.

Como en este caso los vecinos se unen como un solo consumidor, alcanzan la potencia necesaria para contratar la tarifa 3.0. Esta tarifa tiene precios de energía bajos pero el término fijo es prácticamente el doble que las tarifas convencionales.

Por otro lado, la potencia instantánea consumida por la comunidad, es decir, la suma de las potencias de consumo de red de los vecinos es una curva más homogénea que el consumo individual de cada vecino por separado. Esto significa que la potencia máxima contratada por la comunidad es menor que la suma de las potencias que hubiesen contratado los vecinos por separado. En definitiva, los vecinos reducen la potencia que han de contratar individualmente. Para este caso la potencia contratada es de 13,8kW y se ha decidido que la potencia contratada se pague a partes iguales, es decir, 1,38kW por vecino.

Los resultados obtenidos en esta modalidad son los agrupados en la tabla 10.

Factura anual Tarifa 3.0				
Vecino	Óptimo Colectivo			
	Factura	Inversión Individual	Inversión Anual Individual	Factura Total
Perfil 1	358,81 €	2.697,83 €	134,89 €	493,70 €
Perfil 2	1.316,94 €	2.697,83 €	134,89 €	1.451,83 €
Perfil 3	452,74 €	2.697,83 €	134,89 €	587,63 €
Perfil 4	423,27 €	2.697,83 €	134,89 €	558,16 €
Perfil 5	374,60 €	2.697,83 €	134,89 €	509,49 €
Perfil 6	428,79 €	2.697,83 €	134,89 €	563,68 €
Perfil 7	516,35 €	2.697,83 €	134,89 €	651,24 €
Perfil 8	549,78 €	2.697,83 €	134,89 €	684,67 €
Perfil 9	390,44 €	2.697,83 €	134,89 €	525,34 €
Perfil 10	448,37 €	2.697,83 €	134,89 €	583,26 €
TOTAL	5.260,09 €	26.978,30 €	1.348,92 €	6.609,00 €

Tabla 10: Resultados del autoconsumo agrupado con óptimo colectivo

Con esta modalidad la única diferencia en los costes de los vecinos es el término variable, es decir, el coste de la energía, ya que, el resto de los gastos se asumen de forma homogénea. Esto se puede ver en la ilustración 73.



Ilustración 73: Distribución de costes por concepto, autoconsumo agrupado óptimo colectivo

4.4. Autoconsumo agrupado con óptimo individual

Como ya se ha mencionado, el modelo anterior no es unánimemente justo. A continuación, se va a exponer un mejor modelo de autoconsumo agrupado que busca el número de paneles óptimo para cada vecino de forma individual. De esta forma, cada vecino paga su parte proporcional de los costes dependientes de potencia en la inversión, y de forma equitativa los costes fijos. En este caso la potencia contratada es igual que en el anterior: 13,8kW. No obstante, para ser más justos, la parte a pagar del término fijo por cada vecino es la parte proporcional de su potencia instantánea máxima respecto a la suma de las potencias instantáneas máximas de toda la comunidad.

$$TF_i = TF_T \cdot \frac{P_{máx i}}{\sum_{vecinos} P_{máx i}} \quad (21)$$

Donde TF_i es la parte proporcional del término fijo que paga cada vecino, TF_T es el término fijo total de la comunidad y $P_{máx i}$ es la potencia máxima instantánea de un vecino.

En primera instancia se ha realizado la simulación con los costes de energía y potencia contratada de la tarifa 3.0. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11.

Factura anual Tarifa 3.0					
Vecino	Nº paneles óptimo	Factura	Inversión Total	Inversión Anual	Total
Perfil 1	8	310,97 €	2.200,30 €	110,02 €	420,99 €
Perfil 2	13	1.122,54 €	3.348,62 €	167,43 €	1.289,98 €
Perfil 3	10	299,22 €	2.659,63 €	132,98 €	432,20 €
Perfil 4	8	293,33 €	2.200,30 €	110,02 €	403,35 €
Perfil 5	4	264,04 €	1.281,65 €	64,08 €	328,12 €
Perfil 6	10	307,19 €	2.659,63 €	132,98 €	440,17 €
Perfil 7	13	351,16 €	3.348,62 €	167,43 €	518,59 €
Perfil 8	13	375,78 €	3.348,62 €	167,43 €	543,21 €
Perfil 9	7	287,49 €	1.970,64 €	98,53 €	386,02 €
Perfil 10	11	310,77 €	2.889,29 €	144,46 €	455,23 €
TOTAL	97	3.922,50 €	25.907,29 €	1.295,36 €	5.217,87 €

Tabla 11: Resultados del autoconsumo colectivo con óptimo individual, tarifa 3.0

Como se ha podido comprobar, el autoconsumo agrupado optimizado al conjunto termina siendo menos económico que el caso del optimizado al individuo, incluso el neto de la comunidad es más costoso.

Esto puede resultar sorprendente en primera instancia, pero la explicación es muy sencilla. Cuando se calcula la potencia instalada óptima para la comunidad y se decide repartir la participación de la energía generada de forma homogénea, se está cometiendo un error grave en el funcionamiento de este pequeño mercado. Los vecinos con bajos consumos están invirtiendo en potencia instalada que va a ser consumida por vecinos y no por ellos. Este desequilibrio es perjudicial para ambos, ya que, para el bajo consumidor el pago que recibe por la energía sobrante no es suficiente para compensar el coste extra de instalación respecto al que hubiese sido el ideal. Por otro lado, el gran consumidor se ha tenido que conformar con tener menos participación en la potencia instalada que la que hubiese sido la óptima y, ahora, se ve obligado a pagar al vecino por una energía que ya preveía consumir.

Este sistema no solo resulta ser más justo, si no más eficiente. En este caso, solo el término fijo de la factura se paga a partes iguales, el resto de los conceptos dependen de la potencia instalada de cada vecino y sus consumos de energía.

En este caso también se han representado los distintos conceptos de costes en la ilustración 74.

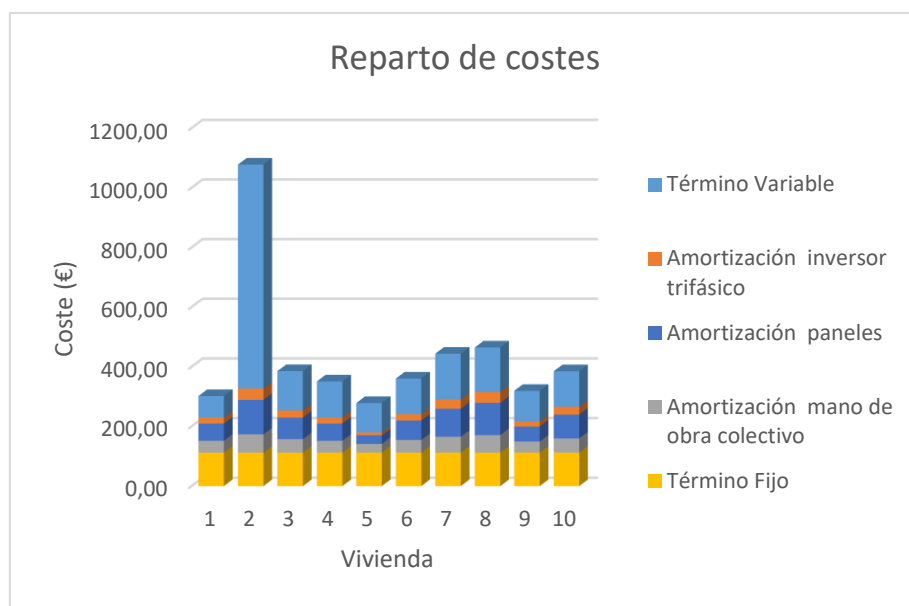


Ilustración 74: Distribución de costes por concepto, autoconsumo agrupado óptimo individual

También hemos podido comprobar en los datos que la tarifa 3.0 resulta muy costosa por el precio del término de potencia. Los bajos precios de la energía de esta tarifa no compensan el alto coste de la potencia contratada. Para llegar a hacerlo tendrían que asociarse individuos con consumos eléctricos muy elevados como en el caso del vecino 2.

Tras observar esto, se ha decidido simular este escenario con los precios de la tarifa 2.0DHA y comprobar si los resultados son más favorables. La tabla 12 muestra estos resultados.

Factura anual Tarifa 2.0 DHA					
Vecino	Nº paneles óptimo	Factura	Inversión Total	Inversión Anual	Total
Perfil 1	8	304,30 €	2.200,30 €	110,02 €	414,32 €
Perfil 2	13	1.000,08 €	3.348,62 €	167,43 €	1.167,51 €
Perfil 3	10	293,78 €	2.659,63 €	132,98 €	426,76 €
Perfil 4	8	283,75 €	2.200,30 €	110,02 €	393,77 €
Perfil 5	4	260,34 €	1.281,65 €	64,08 €	324,42 €
Perfil 6	10	307,98 €	2.659,63 €	132,98 €	440,96 €
Perfil 7	13	334,35 €	3.348,62 €	167,43 €	501,78 €
Perfil 8	13	336,48 €	3.348,62 €	167,43 €	503,92 €
Perfil 9	7	279,12 €	1.970,64 €	98,53 €	377,65 €
Perfil 10	11	304,44 €	2.889,29 €	144,46 €	448,91 €
TOTAL	97	3.704,62 €	25.907,29 €	1.295,36 €	4.999,99 €

Tabla 12: Resultados del autoconsumo colectivo con óptimo individual, tarifa 2.0 DHA

Sorprendentemente, al cambiar de tarifa los resultados no varían en exceso.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Para tener una visión general de las distintas estrategias y poder compararlas mejor se han agrupado los resultados en la tabla 13 y reflejado en la gráfica de barras de la ilustración 75.

Costes por escala de colores de menos a más económico:



Costes de las distintas estrategias					
Vecino	SIN FV (2.0DHA)	Autoconsumo Individual (2.0DHA)	Autoconsumo Colectivo (2.0DHA)	Autoconsumo Agrupado homogéneo (3.0)	Autoconsumo Agrupado Particularizado (3.0)
1	559,73 €	612,55 €	430,44 €	493,70 €	420,99 €
2	2.144,80 €	2.090,01 €	1.822,67 €	1.451,83 €	1.289,98 €
3	575,02 €	600,37 €	393,90 €	587,63 €	432,20 €
4	488,09 €	513,95 €	331,85 €	558,16 €	403,35 €
5	292,97 €	417,97 €	284,57 €	509,49 €	328,12 €
6	580,17 €	600,66 €	406,37 €	563,68 €	440,17 €
7	868,66 €	867,24 €	624,25 €	651,24 €	518,59 €
8	890,30 €	796,96 €	529,61 €	684,67 €	543,21 €
9	436,96 €	474,47 €	304,54 €	525,34 €	386,02 €
10	695,48 €	661,48 €	442,84 €	583,26 €	455,23 €
Total	7.532,17 €	7.635,66 €	5.571,04 €	6.609,00 €	5.217,87 €

Tabla 13: Tabla de comparación de los distintos escenarios

En la tabla se puede distinguir en color verde oscuro el menor coste que puede obtener cada uno de los vecinos. Como se puede ver, pese a que en conjunto la estrategia de autoconsumo agrupado es la más económica, solo a 3 de los vecinos les resulta más rentable que el autoconsumo individual con inversión conjunta.

Aunque, tras analizar los múltiples beneficios de la última estrategia, el resultado pueda parecer poco intuitivo, esto se debe a la alta tasa de costes fijos de la tarifa 3.0. El coste fijo de la tarifa 2.0DHA es de 42 euros por kilovatio al año frente a los 85 euros de la 3.0. Este coste extra es, en la mayoría de los casos, demasiado elevado para compensar todas las ventajas de este modelo. En todo caso, este modelo sería rentable para comunidades de vecinos con grandes consumos eléctricos por parte de todos los participantes.

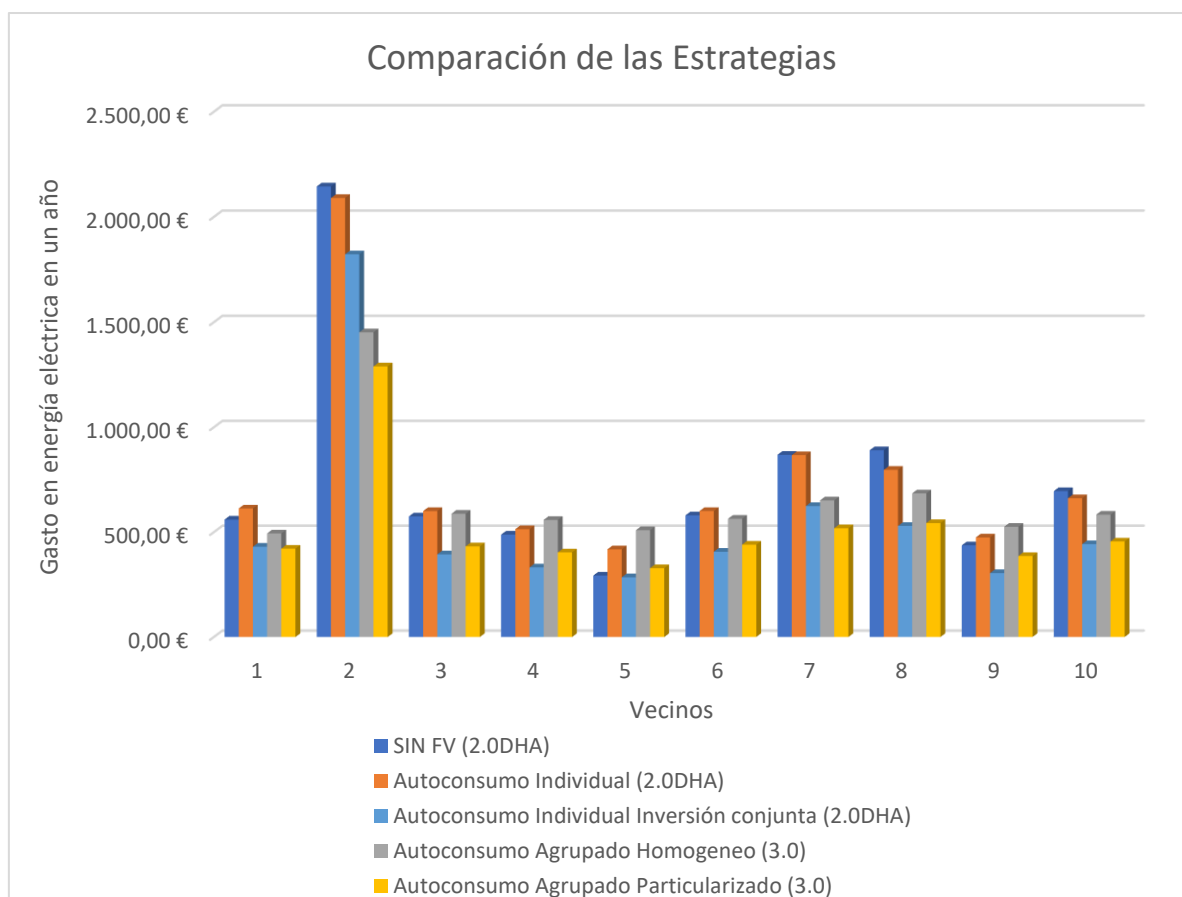


Ilustración 75: Gráfica de comparación de los distintos escenarios

Recapitulando, las conclusiones extraídas de este estudio son las siguientes:

- Tarifa 2.0DHA: Con que el consumo de energía de la vivienda durante el periodo valle sea superior al 38.63% de la energía total, esta tarifa resulta más rentable que la 2.0 sin discriminación horaria.
- El autoconsumo no siempre es rentable, existe un consumo mínimo necesario para justificar la inversión.
- El mayor impedimento en una inversión fotovoltaica son los costes fijos. No obstante, si la inversión se realiza en conjunto, el autoconsumo es rentable en la mayoría de los casos.
- El autoconsumo agrupado junto con el uso de la tarifa 3.0 es una alternativa interesante pero no es trasladable a la mayoría de los casos reales. Para que esta sea beneficiosa es necesario un gran consumo eléctrico de todos los involucrados.

Siguiendo la línea de este estudio, sería interesante comprobar con casos reales de viviendas con grandes consumos y climatización eléctrica, si el modelo de autoconsumo agrupado resulta beneficioso para todos los implicados.

En los próximos años se esperan grandes cambios en el mercado eléctrico y en las tarifas que las comercializadoras ofrecerán, asemejándose mucho al actual mercado de las telecomunicaciones. No obstante, si se conservan opciones de consumos eléctricos elevados como los de la tarifa 3.0, el modelo planteado resultará muy beneficioso para los propietarios de vehículos eléctricos que reducirían en gran medida el coste de la carga del vehículo si lo conectaran en el periodo valle.

6. REFERENCIAS

- [1] Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. BOE. Disponible:
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/04/05/244>
- [2] REN21. 2017. Renewables 2017 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818107-6-9. Disponible:
<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- [3] EurObserv'ER. 2017. The state of renewable energies in Europe. Edition 17. 17th annual overview barometer (Paris). SSN 2555-0195. Disponible:
<https://www.eurobserv-er.org/category/barometer-2017/>
- [4] Red eléctrica de España. 2020. Series estadísticas nacionales. Disponible:
<https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/series-estadisticas-nacionales>
- [5] Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos. BOE. Disponible:
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2012-1310>
- [6] Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo. BOE. Disponible:
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-10927
- [7] Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores. BOE. Disponible:
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-13593>
- [8] Selectra. 2020. ¿Qué son las tarifas de acceso 2.0? (Madrid). Disponible:
<https://companiadeluz.es/info/tarifas/2-0>
- [9] Energía Naranja. 2018. ¿Qué es la discriminación horaria? (Barcelona). Disponible:
<https://energianaranja.es/discriminacion-horaria/>
- [10] Selectra. 2020. Tarifa de acceso 2.1. (Madrid). Disponible:
<https://tarifaluzhora.es/comparador/tarifas-electricas/2-1>
- [11] Selectra. 2020. Tarifas de acceso 3.0A. (Madrid). Disponible:
<https://tarifaluzhora.es/comparador/tarifas-electricas/3-0>

- [12] Selectra. 2020. Comparativa tarifas eléctricas 2020: ¿cuál es la mejor tarifa de luz?. (Madrid). Disponible:
<https://companiadeluz.es/info/tarifas>
- [13] Gobierno de Navarra. 2020. Meteorología y climatología de Navarra, Zona Media. (Pamplona). Disponible:
http://meteo.navarra.es/climatologia/zona_media.cfm
- [14] Sun Earth Tools. 2020. Outils pour les consommateurs et les concepteurs de l'énergie solaire. Disponible:
<https://www.sunearthtools.com/>
- [15] European comission. 2020. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Disponible:
<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [16] Urtasun, Andoni. BLOQUE A: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Tema 2 Fundamentos de los sistemas fotovoltaicos. Sistemas eólicos y fotovoltaicos. 2017-2018. Universidad pública de Navarra. Presentación en Microsoft PowerPoint.
- [17] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. 2020. PUBLICPHOTOVOLTAICS REPORT. (Freiburg). Disponible:
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>
- [18] ERA Solar. 2020. ESPSC Monocrystalline solar module. Disponible:
<https://enera-solar.com/wp-content/uploads/2020/02/Monocrystalline-Solar-Module.pdf>
- [19] Auto Solar. 2020. Paneles de conexión a la red. Disponible:
<https://autosolar.es/paneles-de-conexion-a-red>
- [20] Auto Solar. 2020. Inversores. Disponible:
<https://autosolar.es/inversores>
- [21] Pascual, Julio María. Coste instalación. Universidad pública de Navarra. Notas de tutoría.